

平成 29 年度修士論文

脈動オーロラ主脈動とコーラスバーストの
周期性に関する統計的比較

電気通信大学大学院

情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻

1631033

川村 勇貴

指導教官 細川 敬祐 准教授

副指導教官 富澤 一郎 准教授

提出日 2018 年 1 月 29 日

概要

脈動オーロラは、磁気圏から高エネルギーの電子が準周期的に降り込むことによって、高度 100 km 付近の超高層大気が数秒から数十秒の周期で明滅する現象である。この準周期的変動を主脈動と呼ぶ。脈動オーロラの明滅が、磁気圏に存在するコーラス波動と電子の間の波動粒子相互作用によって作り出されていることが古くから示唆されてきた。特に、近年、脈動オーロラの主脈動とコーラス波動の集団的発生 (コーラスバースト) の間に 1 対 1 対応がある事例が報告されている。しかし、これまで地上観測及び衛星観測の双方において、高時間分解能の観測が定常的に行われてこなかったことにより、脈動オーロラ主脈動及びコーラスバースト出現の周期性について統計的な解析が行われてこなかった。そこで、本研究では、高い時間分解能を有する地上光学観測及び衛星電磁波動観測を統計的に解析することにより、脈動オーロラ主脈動とコーラスバーストの周期性の対応関係を実証することを目的とする。

本研究で用いる観測機器は、ノルウェー・トロムソ (緯度:69.6° 経度:19.2° 磁気緯度:66.2°) に設置されている全天 WATEC 並列イメージャ、及び NASA の Van Allen Probes (VAPs) 衛星の電磁界波動センサー (EFW, EMFISIS) である。全天 WATEC 並列イメージャは共通の小型カメラと魚眼レンズ、及び透過波長の異なる複数のフィルターで構成されており、脈動オーロラに伴う発光の時間変化を 1 秒という高い時間分解能で撮像している。また、VAPs の EFW には、波動観測の周波数分解能を落とすことで容量を削減し、電磁界強度を 8 Hz という高い時間分解能で連続的に記録している Filter Bank と呼ばれるデータ (FBK データ) が存在する。FBK データは 8 Hz という高い時間分解能で電磁界の波動成分を観測しているため、数秒から数十秒の周期で再帰的に現れるコーラスバーストの統計解析を大量のデータに基づいて行うことができる。

本研究では、全天 WATEC 並列イメージャによって 2010 年 11 月から 2013 年 3 月の期間に取得された波長 557.7 nm の撮像データ、及び VAPs 衛星によって 2014 年 6 月から 2015 年 1 月の期間に取得された FBK データを用いて、脈動オーロラ主脈動及びコーラスバーストの周期性に関する統計解析を行った。解析ウィンドウを 5 分として脈動オーロラの輝度値及びコーラス波動の電磁界強度の時系列データに対して FFT による周波数解析を行うことで、主脈動及びコーラスバーストの周波数分布を統計的に導出した。その結果、主脈動についてはピーク周波数が 0.10 Hz、ピーク周期が 10.0 s であり、平均周波数は 0.12 Hz、平均周期は 8.33 s であった。またコーラスバーストについてはピーク周波数が 0.16 Hz、ピーク周期が 6.25 s であり、平均周波数は 0.15 Hz、平均周期は 6.67 s であった。さらに、脈動オーロラの形状 (Arc 状か Patch 状か) でイベントを分類したうえで周波数分布

を導出したところ、周期性は形状に大きく依存しないことが分かった。このことは主脈動及びコーラスバーストの周期性はコーラス波動の空間分布に依存していないことを示唆している。さらに、L 値 及び磁気地方時 (MLT) に対する依存性について解析したところ、コーラスバーストの周期性は L 値と MLT の両方に依存しており、L 値が大きくなる (高緯度に行く) ほど、MLT が遅くなる (朝方に行く) ほど、高い周波数で変動する傾向にあることが明らかになった。主脈動とコーラスバーストの周波数分布を詳細に比較すると、コーラスバーストで見られる 0.2 - 0.4 Hz (2.5 - 5.0 s) の速い時間変化が、主脈動においてはほとんど見られないという違いがあることが分かった。この違いを生み出す原因として、電子が磁気赤道面から地球電離圏に到達するまでの飛行時間である Time of flight (TOF) 及び全天 WATEC 並列イメージャが観測している 557.7 nm の発光に伴う酸素原子の Life time の時定数の分散が考えられる。そこで、TOF 及び 波長 557.7 nm の発光の Life time の双方が持つ分散がコーラスバーストの時間変化に対してどのような影響を与えるのかについてのシミュレーションを行った。その結果、TOF 及び波長 557.7 nm の発光の Life time の分散はコーラスバーストの速い時間変化 (0.2 - 0.5 Hz) を鈍らせる効果があることがわかった。その結果、主脈動はコーラスバーストの速い時間変化 (0.2 - 0.5 Hz) に対して応答することができないため、周波数分布に違いが見られているものと考えられる。これらの要因を考え合わせると、脈動オーロラの主脈動とコーラスバーストの周期性には良い一致が存在すると結論付けられる。このことはコーラスバーストの集団的発生が脈動オーロラの明滅周期をコントロールしていることを意味するものである。

目 次

第 1 章	序論	3
1.1	地球磁気圏	3
1.2	地球電離圏	4
1.3	オーロラ	5
1.4	脈動オーロラ	7
1.5	脈動オーロラとコーラス波動の関係	9
1.6	脈動オーロラの時間変化に関する先行研究	11
1.7	目的	13
第 2 章	観測機器	14
2.1	地上光学観測	14
2.2	衛星電磁界波動観測	15
第 3 章	解析手法	17
3.1	イベントリストの作成	17
3.2	イベントの同定	18
3.3	時間変化の抽出	20
3.4	FFT による周波数スペクトルの導出	22
第 4 章	結果	24
4.1	平均・最頻周波数 周波数分布	24
4.2	主脈動の周期性の形状依存性	28
4.3	コーラスバーストの L 値及び MLT 依存性	30
第 5 章	考察	38
5.1	Time of flight (TOF) の分散	38
5.2	557.7 nm の発光に伴う酸素原子の Life time の分散	39
5.3	TOF と Lifetime の影響	41
5.4	L 値ごとの TOF と Lifetime の影響	44

5.5 主脈動と再現された波長 557.7 nm の差異	46
第 6 章 まとめ	48
第 7 章 謝辞	50

第1章 序論

1.1 地球磁気圏

地球は磁化惑星であり、地球近傍に固有の磁場を発生させており、この地球固有の磁場は双極子磁場で近似することができる。地球固有の磁場が支配的な領域を磁気圏 (Magnetosphere) と呼ぶ。図 1.1 に磁気圏の大規模構造を示す。

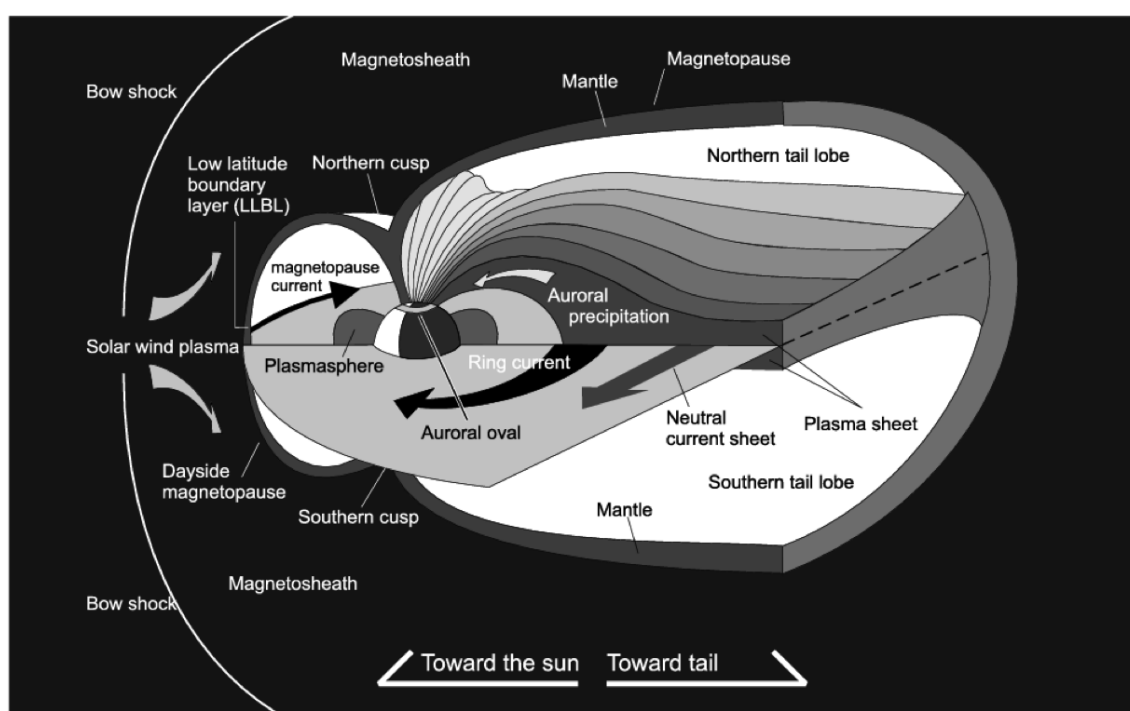


図 1.1: 磁気圏の大規模構造

磁気圏の外側の境界は磁気圏界面 (Magnetopause) と呼ばれており、太陽から吹き付ける高速のプラズマ流 (太陽風) の影響によって、反太陽方向に引き伸ばされた形となっている。磁気圏界面は太陽側で地球半径の約 10 倍、側面では約 15 倍であり、反太陽方向では地球半径の数百倍より遠くに伸びている。この反太陽方向に伸びている領域は磁気圏尾部 (Magnetotail) と言われている。また、磁気圏境界面の太陽側では、超音速の太陽風が磁気圏に遮られることによりバウショック (Bow shock) と呼ばれる衝撃波面が形成されている。バウショックか

ら磁気圏境界面までの領域はマグネトシース (Magnetosheath) と呼ばれている。磁気圏尾部赤道面付近には熱いプラズマが蓄積されているプラズマシート (Plasmasheet) と呼ばれる領域が存在し、オーロラの発生原因となる高エネルギー荷電粒子の主な供給源である。プラズマシートの南北両側に存在し、プラズマの圧力よりも磁場の圧力が卓越している領域はローブ (Lobe) と呼ばれている。また、プラズマシートより地球側にあり、高エネルギープラズマが存在する領域は放射線帯 (Radiation belt) と呼ばれている。放射線帯には様々な電磁波動が存在し、高エネルギー粒子と相互作用を引き起こしている。放射線帯よりもさらに内側に存在し、冷たいプラズマで満たされた領域はプラズマ圏 (Plasmasphere) と呼ばれている。磁気圏は、太陽風動圧が増えたときや太陽風の磁場が南向きの成分を持つときに活発になり、磁気嵐等といった現象が引き起こされる。これらの現象は磁気圏内のプラズマ環境を大きく変化させ、磁気圏と磁力線を介して結合している電離圏にも影響を及ぼしている。その代表例がオーロラである。

1.2 地球電離圏

電離圏とは太陽の極端紫外線放射により、中性大気が部分的に電離した領域である。図 1.2 は電離圏に存在するイオン種毎にその密度の高度分布を示したものである。電離圏は高度 60 - 800 km 程度の範囲に存在し、電子密度の高度分布及びイオン種に基づいて D 領域 (60 - 90 km)、E 領域 (90 - 150 km)、F 領域 (150 km 以上) の 3 つの領域に区分される。電離圏のイオン組成は中性大気組成が変わるにつれて変化する。高度 150 km 以下では一酸化窒素イオンと酸素分子イオンが支配的であり、その上では酸素原子イオンが支配的となる。高度 1000 km 以上では酸素原子イオンよりも水素イオンが支配的なイオン種別となる。しかしながら、オーロラ領域で擾乱が強まると重いイオンが高度 200 km 以上の領域でも卓越することがある。

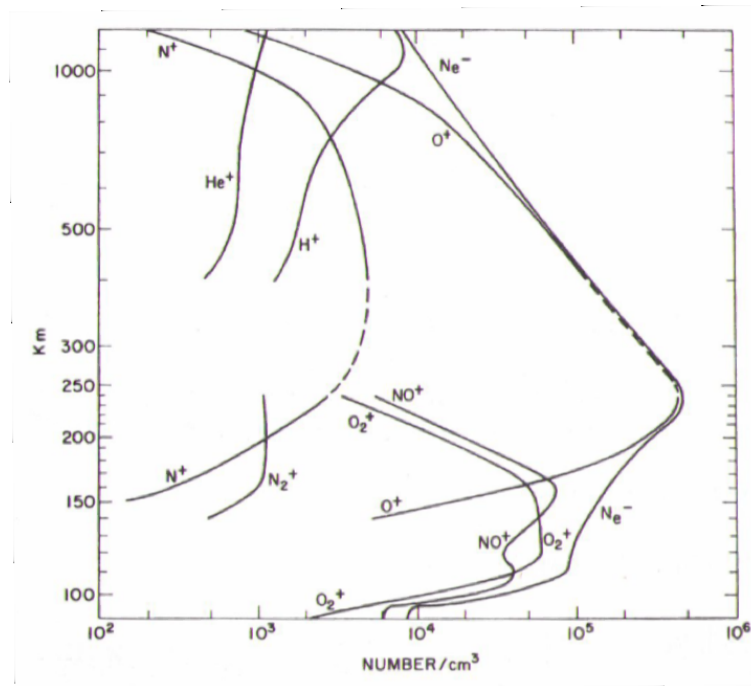


図 1.2: 電離圏における高度別のイオン種別の分布 [Hargreaves, 1979]

1.3 オーロラ

1.1 節で述べたように磁気圏と電離圏は磁力線を介して結合しており、磁気圏 (主に磁気圏尾部のプラズマシート) から数百 eV - 100 keV のエネルギーを持つ電子が、磁力線に沿って降り込んできている。そして、磁力線に沿って降り込んできた電子が電離圏の原子や分子を衝突することで起きる発光現象がオーロラである。図 1.3 はオーロラの発生の模式図を示している。プラズマシートから磁力線に沿って、オーロラの発光に寄与している電子が降り込んでいる様子を表している。

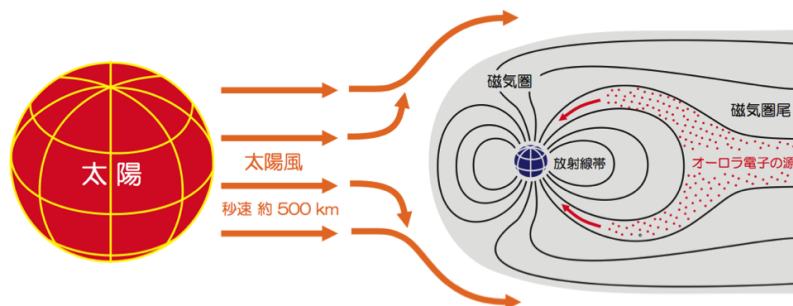
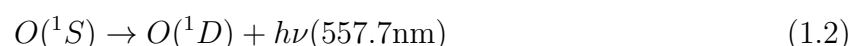
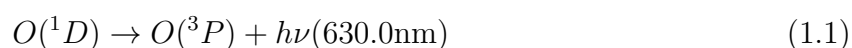


図 1.3: オーロラ発生の模式図

磁力線に沿って降り込んできた電子は、電離圏に存在する中性大気原子や分子と衝突し、それらを励起状態へと変化させる。励起状態の原子、分子はより安定した状態へと戻る際に、余分なエネルギーを光として放出する。これがオーロラの発光である。オーロラの発光の大部分は、電離圏大気の支配的な成分である窒素分子、窒素原子、酸素分子、酸素原子、又はそれらのイオンの発光輝線である。大気中の原子及び分子がオーロラの発光に寄するか否かは、降下電子のエネルギー及び大気の高高度分布に依存している。代表的な発光輝線は酸素原子の $^1D - ^3P$ の遷移による波長 630.0 nm の赤色の発光輝線及び $^1S - ^1D$ の遷移による波長 557.7 nm の緑色の発光輝線である。上述のように、オーロラの発光色は高度に依存しており、高度 200 km 以上に存在する素原子によるオーロラは赤色光を発しており、その波長は 630.0 nm である。また、高度 100 km 付近に存在する酸素原子によるオーロラは緑色光を発しており、その波長は 557.7 nm である。以下に波長 630.0 nm 及び 557.7 nm の発光の反応式を示す。



オーロラは形状がはっきりとしたカーテン状のディスクリートオーロラと、形状がぼんやりしたディフューズオーロラの2種類に大別される。図1.4及び1.5にディスクリートオーロラ及びディフューズオーロラの全天画像を示す。ディスクリートオーロラはカーテン状のはっきりとした形状で、ディフューズオーロラはぼんやりとした形状をしていることが見て取れる。

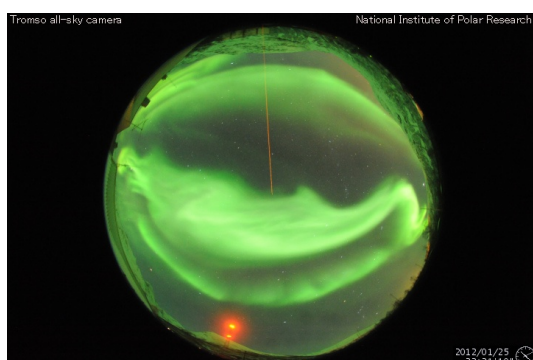


図 1.4: ディスクリートオーロラ

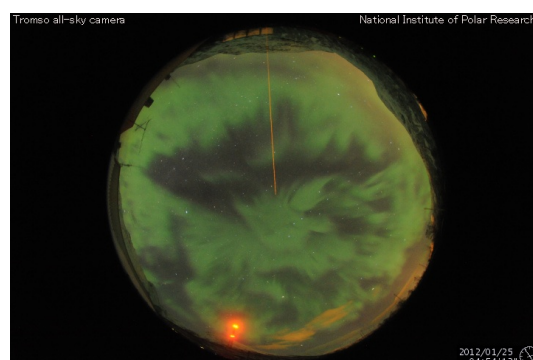


図 1.5: ディフューズオーロラ

1.4 脈動オーロラ

主に朝方に、高度 100 km 付近で発生するディフューズオーロラの中には、脈動オーロラ (Pulsating Aurora: PsA) と呼ばれる発光強度が準周期的に変化する現象が存在する。ディフューズオーロラの殆どは、上記のように準周期的に輝度値が変化しており、PsA は非常に普遍的な現象であるといえる。PsA はオーロラサブストームの回復相において真夜中近くから朝方にかけて頻繁に発生することが知られている [Kvifte and Pettersen, 1969; Jones et al., 2011]。図 1.6 に PsA の発生分布を示す [Jones et al., 2011]。図 1.6 の一点破線は PsA の発生率、点線は観測データ数、破線は PsA のイベント数をそれぞれ示している。図 1.6 から分かるように、PsA は 0 - 6 MLT の時間帯に多く発生し、0 - 3 MLT の間に発生率が 50 % から 60 % 以上に増加していること、朝方まで高い発生率が続いていることが見て取れる。

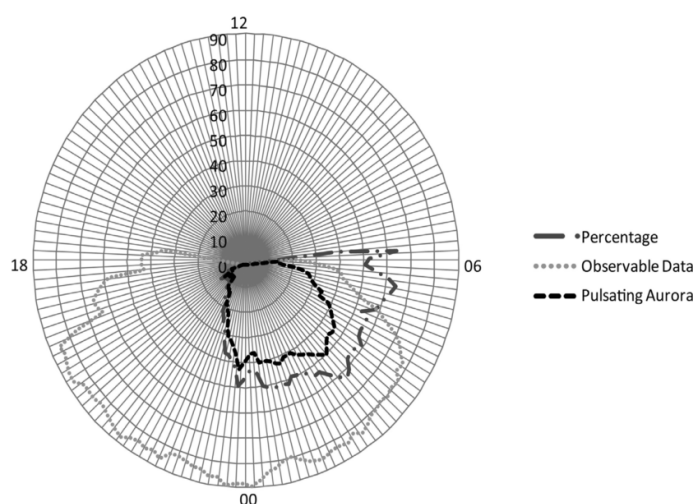


図 1.6: PsA 発生 of MLT 分布 [Jones et al., 2011]

PsA の空間的な構造は、東西方向に大きく広がった Arc 状と、Arc 状のものが散り散りになった結果として現れる Patch 状の 2 つに大別されるが [Royrvik and Davis, 1977; Yamamoto, 1988; Sato et al., 2004]、緯度・経度方向に伝播する性質を持つものや拡大・収縮をするもの [Yamamoto and Oguti, 1982; Yamamoto, 1984; Oguti, 1975] もあり、その形態は多様である。図 1.7 及び 1.8 に Arc 状の PsA 及び Patch 状の PsA の全天画像を示す。

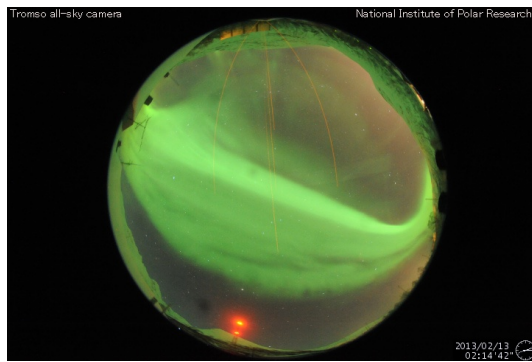


図 1.7: Arc 状の PsA

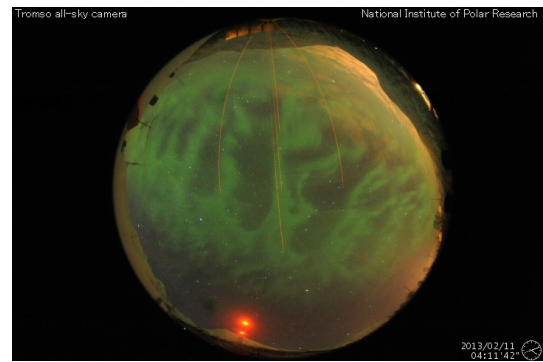


図 1.8: Patch 状の PsA

また、PsA は数秒から数十秒の周期 [Royrvik and Davis, 1977; Yamamoto, 1988] で明滅する主脈動と呼ばれる準周期的な変動の中に、さらに細かい数 Hz 周期の細かい変動 [Royrvik and Davis, 1977; Kataoka et al., 2012] が重畳している、階層的周期構造を持っていることが知られている。この細かい変動は内部変調、もしくは準 3 Hz 変調と呼ばれている。図 1.9 に PsA の持つ階層的周期構造の模式図を示す。図 1.9 の上段、下段共に、縦軸がオーロラの輝度値を、横軸が時間を示しており、上段が主脈動を、下段が内部変調をそれぞれ示している。数秒から数十秒の明滅 (主脈動) の中に数 Hz 周期の細かい変動 (内部変調) が含まれていることが見て取れる。

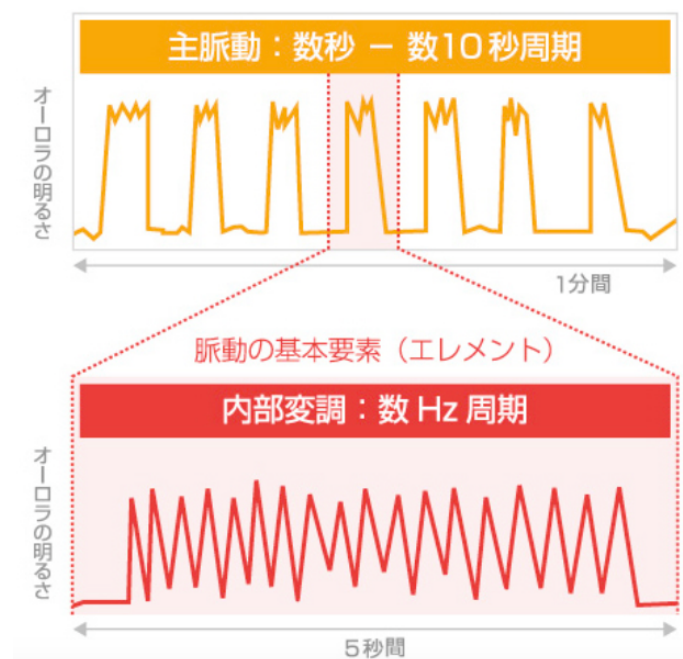


図 1.9: PsA に見られる階層的周期構造 [http://www.psa-research.org/project/]

1.5 脈動オーロラとコーラス波動の関係

コーラス波動は磁気圏に存在する強度が準周期的に変調するホイッスラーモードの電磁波動 [Thorne, 2010] であり、個々の独立したコーラスエレメントが集団的に発生する性質を持っている [Li et al., 2012]。また、コーラス波動が出現する周波数は、電子のジャイロ周波数 (f_{ce}) に依存しており、 $0.1 - 0.8 f_{ce}$ に発生することが知られている。コーラス波動は $0.5 f_{ce}$ 付近を境に 2 つの周波数帯に発生する性質を持っており、 $0.5 f_{ce}$ 以上の周波数帯に発生するものは Upper band chorus (UBC)、 $0.5 f_{ce}$ 以下の周波数帯に発生するものは Lower band chorus (LBC) と呼ばれている。図 1.10 の上段及び下段は THEMIS 衛星が観測した電場の Frequency-Time diagram (f-t diagram) であり、縦軸が周波数を、横軸が時間を示しており、色は磁場に見られる波動の強度を示している。また、白線は $0.5 f_{ce}$ を示している。まず、下段に注目すると、 $0.5 f_{ce}$ 以下の周波数帯である 700 - 1500 Hz においてコーラスエレメントが繰り返し、集団的に発生していることが見て取れる。このようなコーラスエレメントの集団的発生をコーラスバーストと呼ぶ。上段は、下段の赤矢印部分をクローズアップしたもので、個々のコーラスエレメントの存在を確認することができる。このように、コーラス波動も PsA と同様に階層的周期構造を持っていることがわかる。

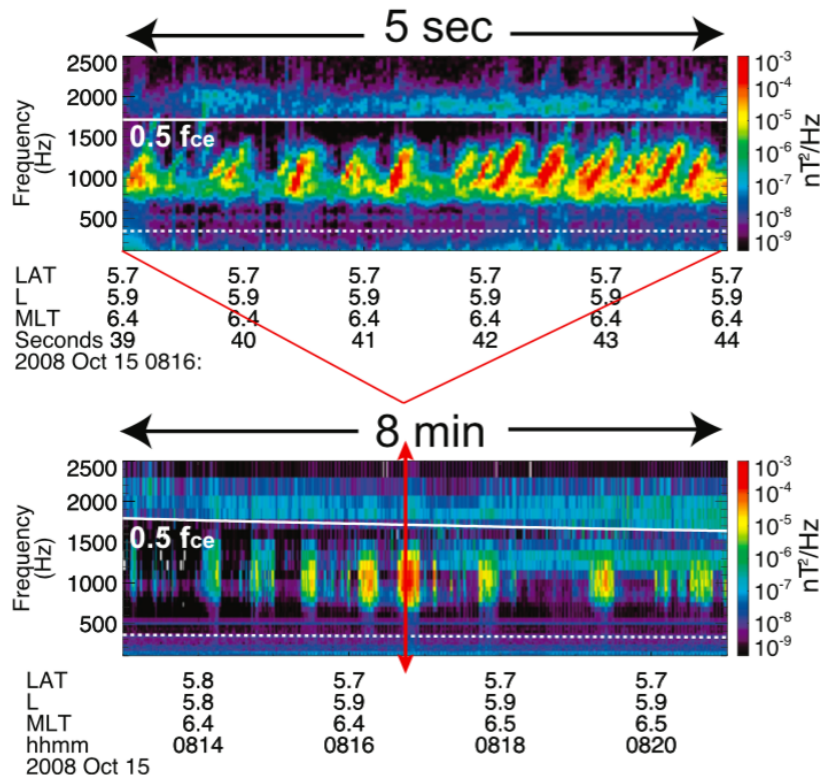


図 1.10: THEMIS 衛星により観測された LBC の例 [Li et al., 2012]

PsA の明滅を作りだしている要因は、磁気圏からの数 keV から数十 keV のエネルギーをもつ電子の準周期的な降り込みであると考えられている [Sandahl et al., 1980; Miyoshi et al., 2010; Nishiyama et al., 2011]。このような準周期的な電子の降り込みは、磁気赤道面におけるコーラス波動と電子との波動粒子相互作用 (サイクロトロン共鳴) [Kennel and Petschek, 1966] によるピッチ角散乱によって引き起こされていると考えられている [Thorne et al., 2010]。図 1.11 に PsA を引き起こす準周期的な電子の降り込みの模式図を示す。図 1.11 において、橙色の領域がコーラス波動が存在している領域、赤矢印がコーラス波動、白線が地球の磁力線、白矢印が電子の運動方向、右の球体が地球をそれぞれ示している。橙色の領域において、電子とコーラス波動がサイクロトロン共鳴を起こすことで、電子のピッチ角が散乱され、準周期的な電子の降り込みを引き起こしている。

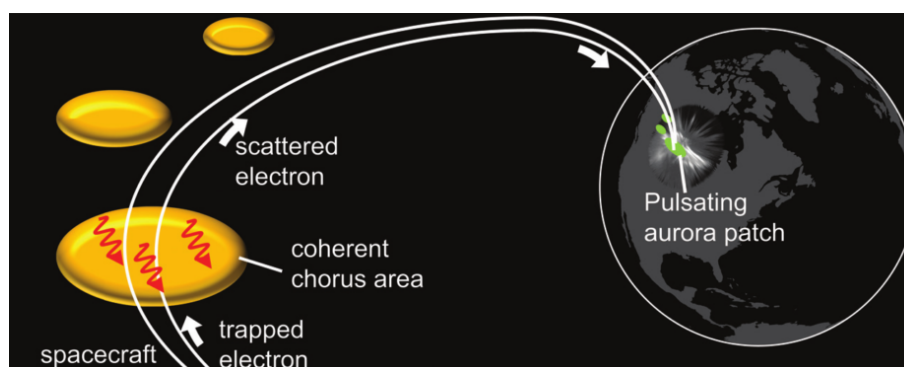


図 1.11: PsA 発生の模式図 [Li et al., 2012]

主脈動の周期性は、上述のコーラスバーストの周期性を反映していると考えられており、Nishimura et al. [2010] 及び Nishimura et al. [2011] は主脈動とコーラスバーストの関係について事例解析を行うことで、両者の間に 1 対 1 の対応関係が存在することを示した。図 1.12 に Nishimura et al. [2010] が行った解析の概略図を示す。左上段が観測の全体像を、右上段が衛星により観測されたコーラス波動、左下段が全天カメラにより観測された PsA、右下段が PsA とコーラス波動の時間変化を比較した図である。右下段の縦軸は PsA の輝度値及びコーラス波動の磁場強度を、横軸は時間を示しており、赤線が PsA の時間変化、青線がコーラス波動の時間変化をそれぞれ示している。PsA とコーラス波動を比較すると、両者は同様の時間変化を示しており、相関係数も 0.88 と非常に高い値をとっている。これらのことから、PsA とコーラス波動の間には 1 対 1 の対応関係があることが示唆された。この事実は PsA の研究がコーラス波動の研究と等価であるということを意味し、さらには波動粒子相互作用の理解、特に波動による電子の加速機構の解明に繋がるという点において、普遍的な意義を有していることを示している。

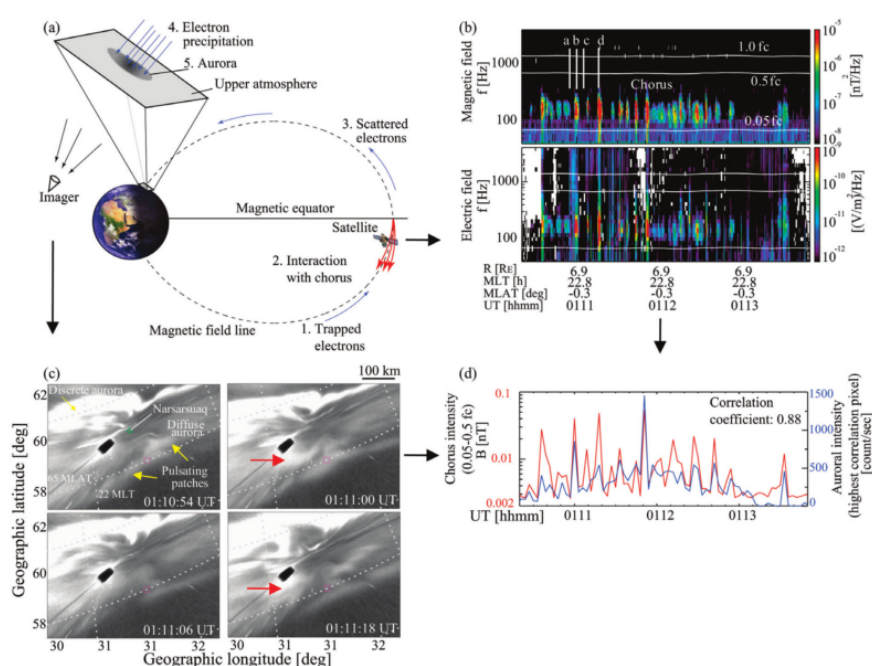


図 1.12: PsA とコーラス波動の 1 対 1 対応の事例報告 [Nishimura *et al.*, 2010] 左上段が観測の全体像、右上段が衛星により観測されたコーラス波動、左下段が全天カメラにより観測された PsA、右下段が PsA とコーラス波動の時間変化を比較した図をそれぞれ示している。

1.6 脈動オーロラの時間変化に関する先行研究

上述のように PsA の研究は長い歴史を持つにも関わらず、数秒から数十秒と比較的長い周期をもつ主脈動についてすら、その周期性を大量のデータに基づいて統計的に示した研究はなされていない。

Yamamoto [1988] は数時間分のデータを用いた事例解析として、主脈動の周期分布を導出し、PsA が発光している ON-time の平均は 6.2 ± 1.7 s、PsA が消光している OFF-time の平均は 14.5 ± 5.3 s、そして平均周期は 20.7 ± 5.4 sであることを示した。しかしながら、この研究は 1 地点で 1 晩に取得された 2 時間半程度のデータにのみ基づいたものであり、大量のデータに基づいた周期性の解析は行われていないために、主脈動の平均・最頻周期やその分布は未だ明らかにされていない。

Duncan *et al.* [1981] は主脈動について 7 晩分の地上光学観測データを用いて、周期分布を導出している。その結果、5 - 10 s が最も支配的な周期であると結論付けている。図 1.13 に Duncan *et al.* [1981] が導出した主脈動の周期分布を示す。図 1.13 の縦軸は発生率を、横軸は周期を示している。

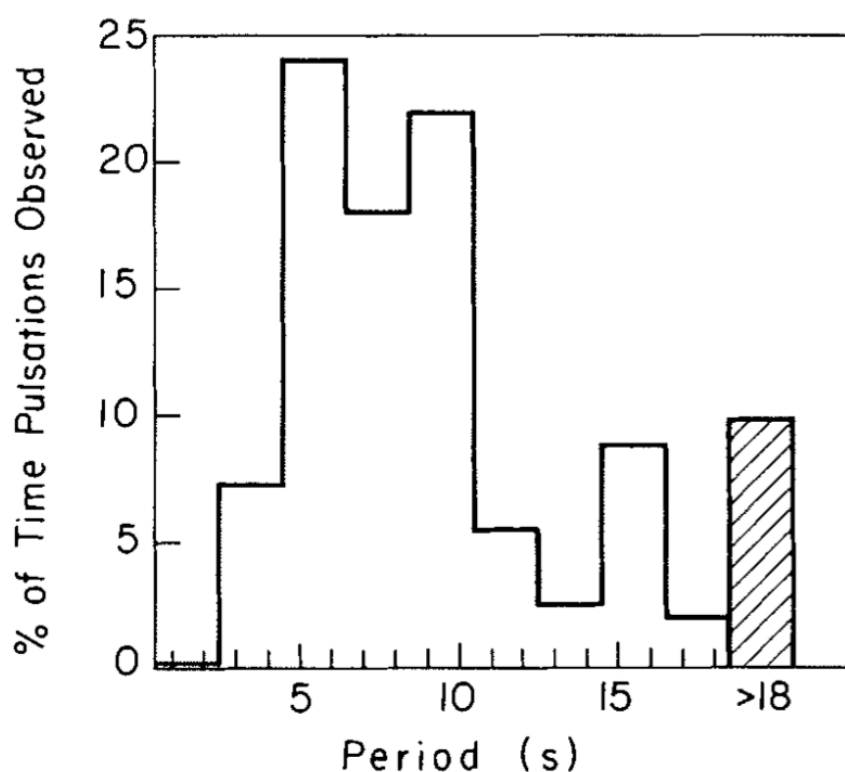


図 1.13: 主脈動の周期分布 [Duncan et al., 1981]

Duncan et al. [1981] は、周期分布の導出に加えて主脈動の周期性の緯度依存性の検証を行った。しかしながら、十分なデータ数を得ることができず、統計的に有意な結果を得ることはできなかった。

このように、主脈動について、長期間のデータに基づいた平均周期の算出や周期分布の導出はなされておらず、また、主脈動の周期性がどのようなパラメータに依存しているのかについても明らかになっていない。また、コーラスバーストの周期性については事例解析すら行われておらず、依存性はもちろんのこと、平均周期すら明らかになっていないのが現状である。加えて、Nishimura et al. [2010] において、主脈動とコーラスバーストの間に 1 対 1 の対応関係が存在することが示されたにも関わらず、両者の周期性の統計的な性質を比較する研究もこれまでに行われていない。

主脈動及びコーラスバーストの周期性についての統計的な解析が行われてこなかったのは、

1. PsA の形状が非常に複雑であり、自動検出が困難である
2. 主脈動及びコーラスバーストを同定することができる高い時間分解能の観測が定常的に行われてこなかったこと

に起因している。

従って、主脈動及びコーラスバーストの周期性の統計解析を行い、その関連性を明らかにするには、PsA の検出方法の確立及び高時間分解能の定常観測の実施という 2 つの課題を克服する必要がある。

1.7 目的

前節で述べた問題点を踏まえて、本研究では、PsA の自動検出が困難であるという問題を積極的に回避し、目視による PsA イベントリストの構築を行う。また、高時間分解能の定常観測については、ノルウェー・トロムソに EISCAT との同時観測用に設置されている全天 WATEC 並列イメージャと、人工衛星 Van Allen Probes の 2 つの観測機器を組み合わせることによって、高時間分解能の定常観測という問題を克服する。上記の方法により、本研究は、主脈動及びコーラスバーストの周期性を統計的に解析を行い、両者の周期性の統計的な性質を明らかにすることを目的とする。主脈動及びコーラスバーストの周期性の統計的な性質が明らかになれば、PsA 明滅機構を決定するための基礎的な情報を得ることが可能となる。また、主脈動やコーラスバーストの周期性を統計的に導出することで、それらの周期性を決定する要因を議論することが可能となる。

第2章 観測機器

2.1 地上光学観測

ノルウェー・トロムソ (緯度:69.6° 経度:19.2° 磁気緯度:66.2°) の欧州非干渉散乱レーダー (EISCAT) 観測所には、全天 WATEC 並列イメージャが設置されている。この全天 WATEC 並列イメージャは同種の複数台のカメラ (WAT-120N+)、魚眼レンズ (YV2.2x1.4A-SA2) 及び透過波長の異なる光学フィルター (427.8 nm, 557.7 nm, 630.0 nm) から構成されている [Ogawa *et al.*, 2013]。カメラについては、超高感度 CCD を用いたフレーム積分が可能なものを複数台用いている。光学フィルターは半値幅が約 100 nm と広く、かつ透過率が約 90 % と高い製品を加工して用いている。図 2.1 に全天 WATEC 並列イメージャで用いられている光学フィルターの波長透過特性を示す。図 2.1 の縦軸は透過率、横軸が波長を示しており、青線・緑線・赤線はそれぞれオーロラの代表的な発光波長である 427.8 nm、557.7 nm、630.0 nm を、黒線はナトリウム発光の波長 589.3 nm を示している。図 2.2 及び 2.3 に全天 WATEC 並列イメージャ及び全天 WATEC 並列イメージャが撮像している全天画像を示す。本研究では、2010 年 11 月から 2013 年 3 月の期間に、全天 WATEC 並列イメージャから得られた波長 557.7 nm の全天画像を用いて、解析を行った。なお、衛星観測データと時間分解能を合わせるために、2 Hz のデータについては平均操作を行い、1 Hz のデータとして用いた。主脈動の周期性は数秒から数十秒であるといわれているので、1 Hz の時間分解能は主脈動を同定するのに十分であると考えられる。

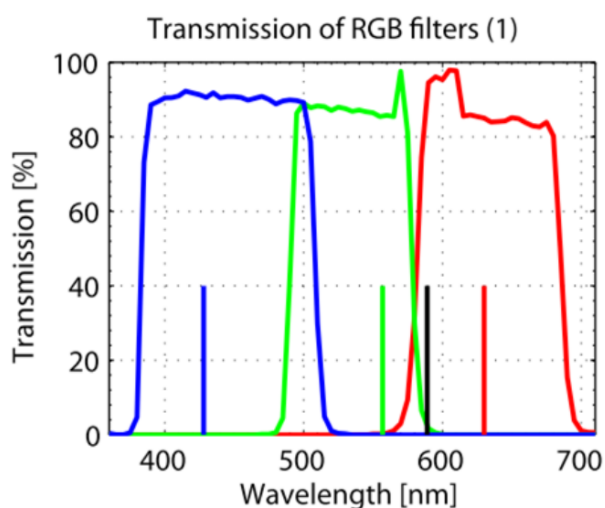


図 2.1: 全天 WATEC 並列イメージャに用いられている光学フィルターの波長透過率特性。



図 2.2: 全天 WATEC 並列イメージャ

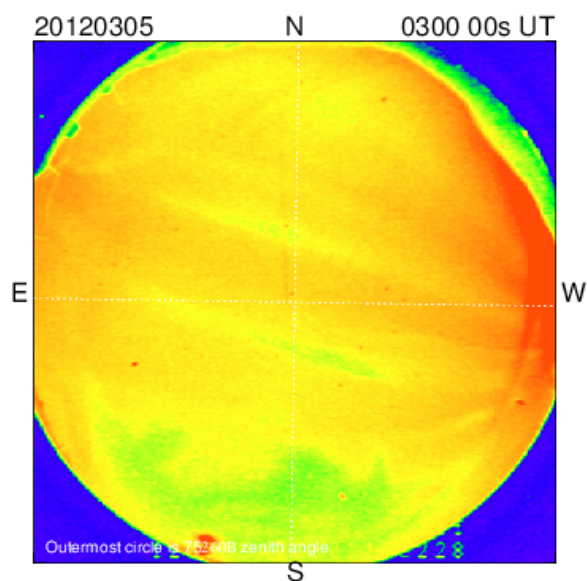


図 2.3: 全天 WATEC 並列イメージャにより撮像された全天画像 (557.7 nm)、疑似カラー表示であることに注意されたい

2.2 衛星電磁界波動観測

NASA が打ち上げた Van Allen Probes (図 2.4) には The Electro and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) [Kletzing *et al.*, 2014] が搭載されてお

り、定常的に電磁界波動観測を行っている。しかしながら、EMFISIS の通常時の時間分解能は6秒であり、コーラスバーストを同定することが困難である。

そこで、本研究では、同じ Van Allen Probes に搭載されている The Electric Field and Waves Instruments (EFW) [Wygant *et al.*, 2014] が記録している Filter Bank Data (FBK データ) を用いた。FBK データは周波数分解能を落とすことで容量を削減し、電磁場強度を8 Hz という高い時間分解能で記録しており、主脈動と同様の周期性を持つと予想されるコーラスバーストの時間変化を同定することが十分に可能である。FBK データは7つの周波数帯で電磁場強度を記録しており、その周波数帯は、0.8 - 1.5 Hz、3 - 6 Hz、12 - 25 Hz、50 - 100 Hz、200 - 400 Hz、800 - 1600 Hz、3200 - 6400 Hz である。本研究では2014年6月から2015年1月の期間に取得された200 - 400 Hz、800 - 1600 Hz、3200 - 6400 Hz の周波数帯の磁場強度のデータを用いて解析を行った。なお、地上観測と時間分解能を合わせるために、8 Hz のデータを平均し、1 Hz のものとして取り扱った。また、地上光学観測と衛星電磁場観測の観測期間が同一期間ではないが、両者は共に朝側において観測を行っているため、本研究で行う統計的な比較には支障をきたさない。



図 2.4: Van Allen Probes [NASA]

第3章 解析手法

3.1 イベントリストの作成

主脈動及びコーラスバーストの周期性の統計解析に先立って、PsA 及びコーラス波動のイベントリストを作成した。

PsA については、図 3.1 に示すような全天 WATEC 並列イメージャが撮像した全天画像から動画を作成した。第 1 章で述べたように PsA の形状は非常に複雑であり、イベントを自動検出することが困難であるので、全天画像から目視により、イベントを選定した。コーラス波動については、図 3.2 に示すような Van Allen Probes に搭載されている EMFISIS が取得している磁場の f-t diagram からイベントの選定を行った。図 3.2 の縦軸は周波数を、横軸は時刻を示している。また、色は強度を示しており、色が赤いほど強度が強く、青いほど強度が弱いことを示している。また、図中の黄線は $0.5 f_{ce}$ 及び $0.1 f_{ce}$ を示している。図 3.2 の 08:00 - 12:00 UT の周波数帯 400 - 1000 Hz においてコーラス波動が出現していることが見て取れる。

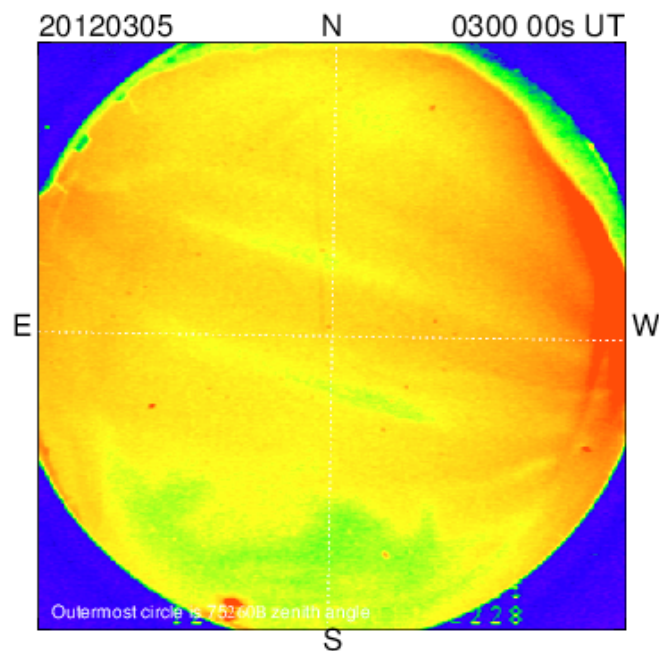


図 3.1: 全天 WATEC 並列イメージャにより撮像された PsA の例

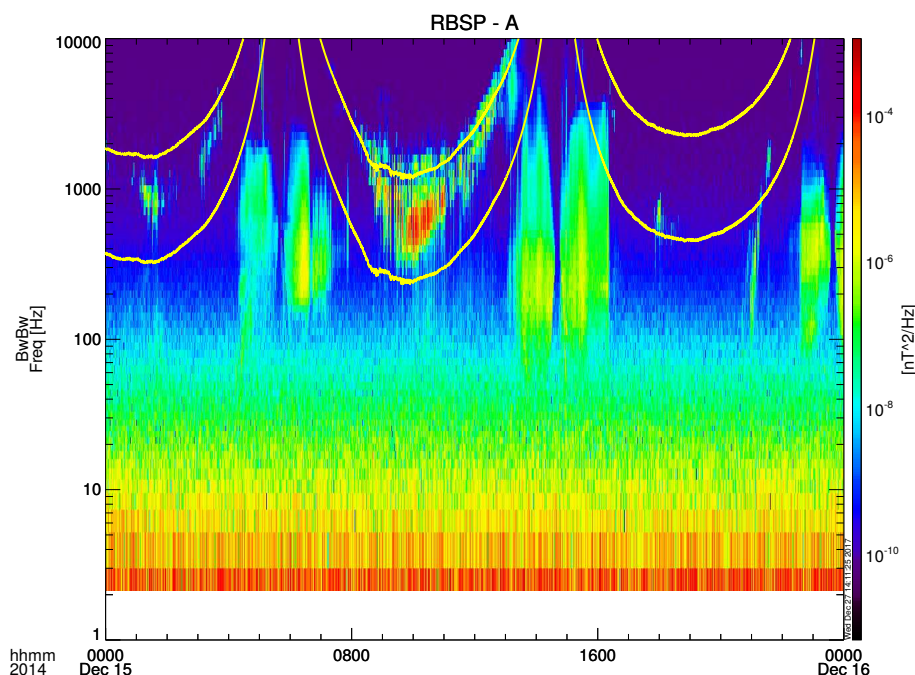


図 3.2: Van Allen Probes によって得られたスピン軸方向の磁場の f-t diagram

3.2 イベントの同定

続いて、3.1 節で作成したイベントリストを元に、解析窓を 5 分として、主脈動及びコーラスバーストのイベントの同定を行った。

まず、主脈動については、図 3.3 に示すような、全天画像の南北方向の断面の輝度値を時系列に並べた Keogram と呼ばれるプロットを 5 分ごとに作成した。図 3.3 の縦軸は天頂角を、横軸は時刻を示している。また、色は輝度値を示しており、色が赤いほど明るく、青いほど暗いことを示している。図 3.3 の天頂角 0 度付近にストライプが入っており、この部分が PsA の主脈動に対応している。この Keogram 及び 3.1 節で作成した全天動画から主脈動のイベントを同定し、全 2087 イベント (時間にすると約 173 時間) を抽出することに成功した。

また、コーラスバーストについては図 3.4 に示すような、f-t diagram を 5 分ごとに作成した。図 3.2 と同様に、図 3.4 の縦軸は周波数を、横軸は時刻を示している。また、色は強度を示しており、色が赤いほど強度が強く、青いほど強度が弱いことを示している。また図中の黄線は $0.5 f_{ce}$ 及び $0.1 f_{ce}$ を示している。図 3.4 中の、400 - 1000 Hz の周波数帯にコーラスバーストが再帰的に発生していることがわかる。コーラスバーストについても、主脈動と同様に目視によりイベントを同定し、その結果、全 2296 イベント (時間にすると約 190 時間) を抽出することに成功した。

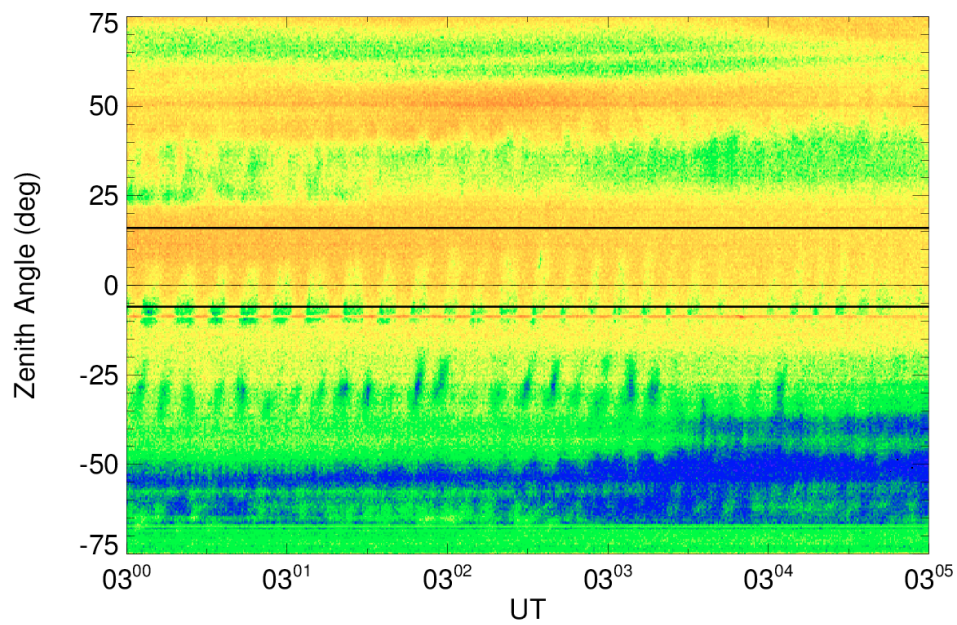


図 3.3: 2012 年 3 月 5 日に 全天 WATEC 並列イメージャにより観測された主脈動。天頂角 0 度付近にストライプが入っており、この部分が PsA の主脈動に対応している。

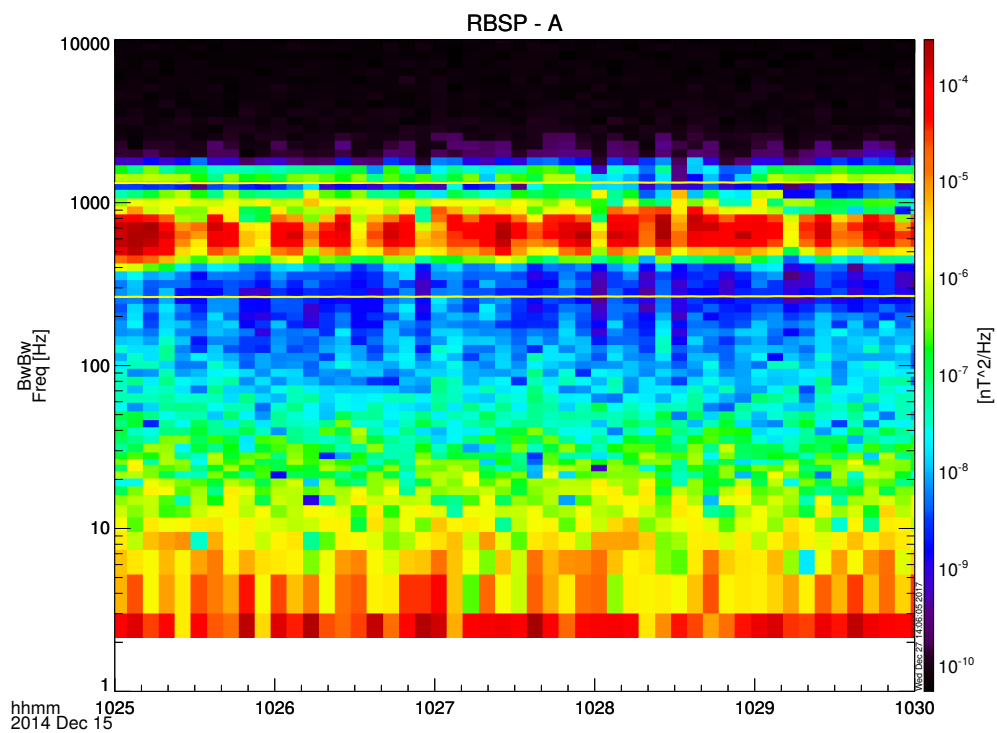


図 3.4: 2014 年 12 月 15 日に Van Allen Probes により観測されたコーラスバースト。400 - 1000 Hz の周波数帯にコーラスバーストが再帰的に発生している。

3.3 時間変化の抽出

3.2 節で同定した各イベントに対して、主脈動及びコーラスバーストの時間変化の抽出を行った。まず、主脈動については、PsA の緯度方向への伝播に対応するために、図 3.3 の黒線で囲われている部分の輝度値を 1 秒ごとに南北方向に足し合わせ、平均することで、図 3.5 に示すような特定の南北断面における輝度値の時間変化を抽出した。図 3.5 の縦軸は輝度値を、横軸は時間をそれぞれ示している。

また、コーラスバーストについては、FBK データの 200 - 400 Hz、800 - 1600 Hz、3200 - 6400 Hz の周波数帯の磁場強度を足し合わせ、平均をとることで、図 3.6 に示すような磁場強度の時間変化を抽出した。図 3.6 の縦軸は磁場強度を、横軸は時間をそれぞれ示している。双方のデータに周期的変化が見られている。

しかしながら、図 3.5 及び 3.6 には主脈動及びコーラスバーストの時間変化に加えて、背景のよりスケールの長い時間変化が存在する。そのため、主脈動及びコーラスバーストのみの周期性を導出することは、このデータセットからでは困難である。

そこで、図 3.5 及び 3.6 に示すような時系列データに対して、時間微分をとることで、主脈動及びコーラスバーストの時間変化のみを抽出した。時間微分を取ることで、低周波成分を除去することができ、周波数解析を行う際に主脈動及びコーラスバーストの周期性を得ることが可能となった。その結果を、図 3.7 及び 3.8 に示す。図 3.7 及び 3.8 の縦軸は微分値を、横軸は時間をそれぞれ示している。図 3.7 及び 3.8 の周期性に注目すると、主脈動、コーラスバースト共に 5 分 (300 秒) の解析窓に対して、約 30 個のピークが存在し、約 10 秒の周期で変動していることがわかる。

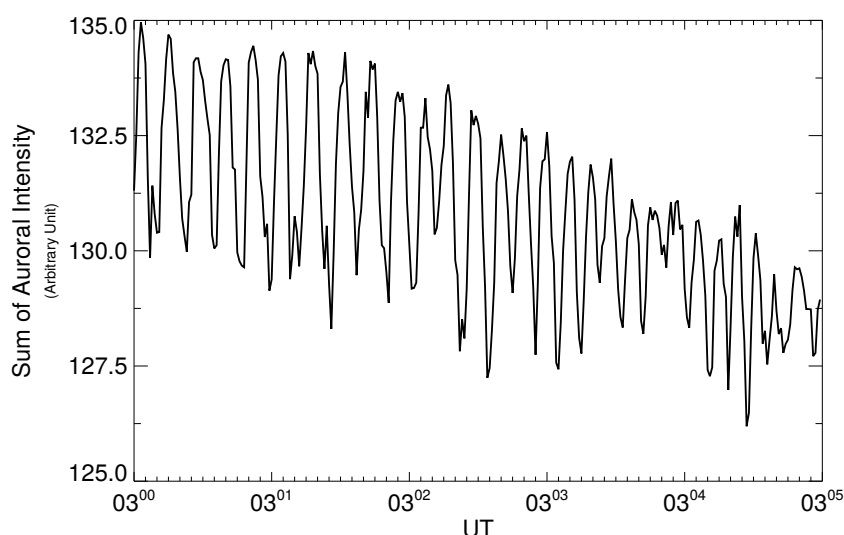


図 3.5: 図 3.3 に示された Keogram の黒線で囲われている領域を南北方向に足し合わせ、平均することで抽出した輝度値の時間変化。

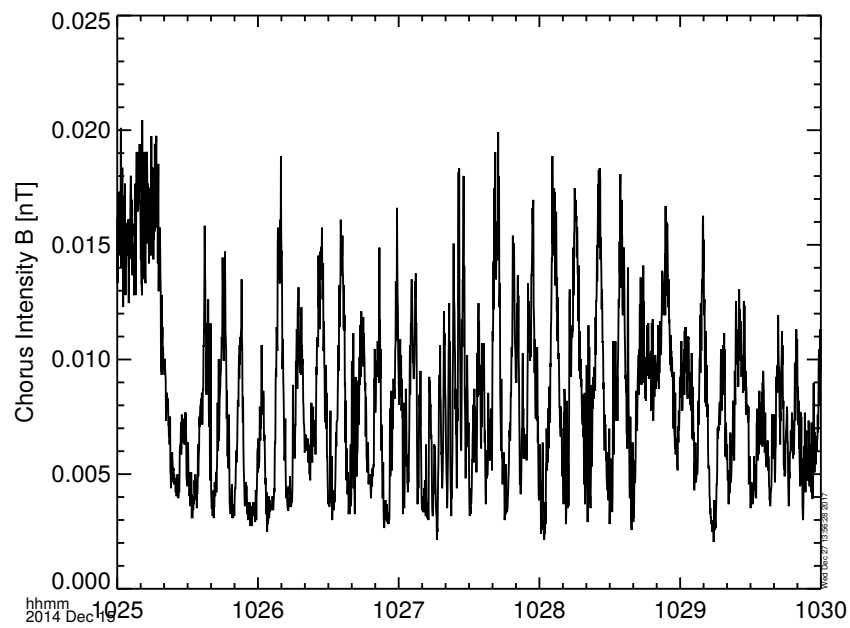


図 3.6: 200 - 400 Hz、800 - 1600 Hz、3200 - 6400 Hz の 3 つの周波数帯を足し合わせ、平均することで抽出した磁場強度の時間変化。

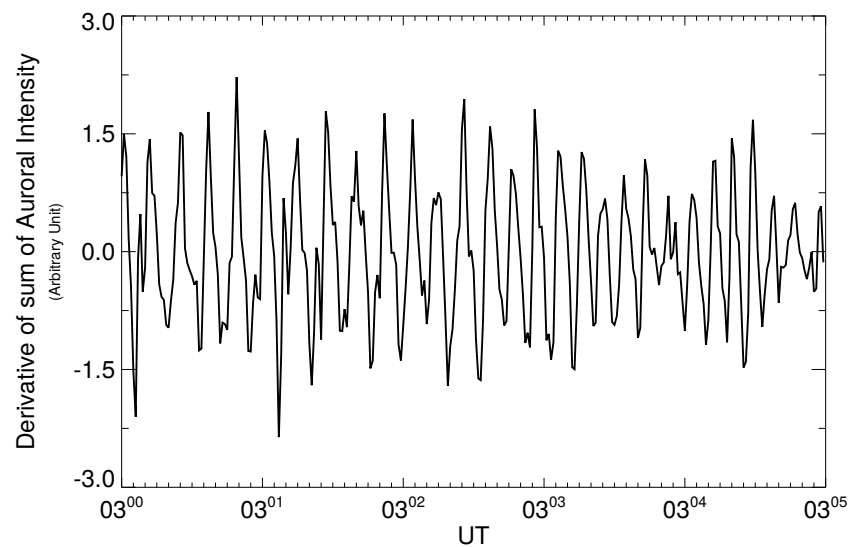


図 3.7: 図 3.5 の輝度値の時間変化に対して、時間微分を取ることで抽出した主脈動の時間変化。

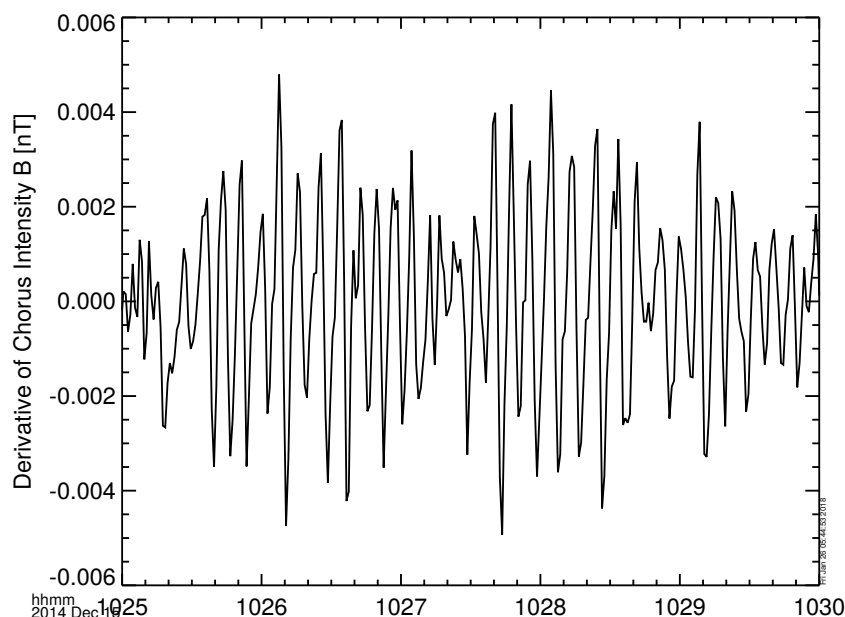


図 3.8: 図 3.6 の波動強度の時間変化に対して、時間微分を取ることで抽出したコーラスバーストの時間変化。

3.4 FFT による周波数スペクトルの導出

3.3 で抽出した主脈動及びコーラスバーストの時間変化に対して、FFT をかけることにより、周波数スペクトルを導出した。また、パワースペクトルについては輝度値や磁場強度に依存することなく周期性のみを比較するために最大値により正規化を行った。図 3.9 及び 3.10 に導出した周波数スペクトルを示す。図 3.9 及び 3.10 の縦軸は最大値により正規化されたパワースペクトルを、横軸は周波数を示している。主脈動、コーラスバースト共に 10 秒 (0.1 Hz) 付近 にピークを持っており、図 3.7 及び 3.8 から目算したおよそその周期性と良い一致を示している。

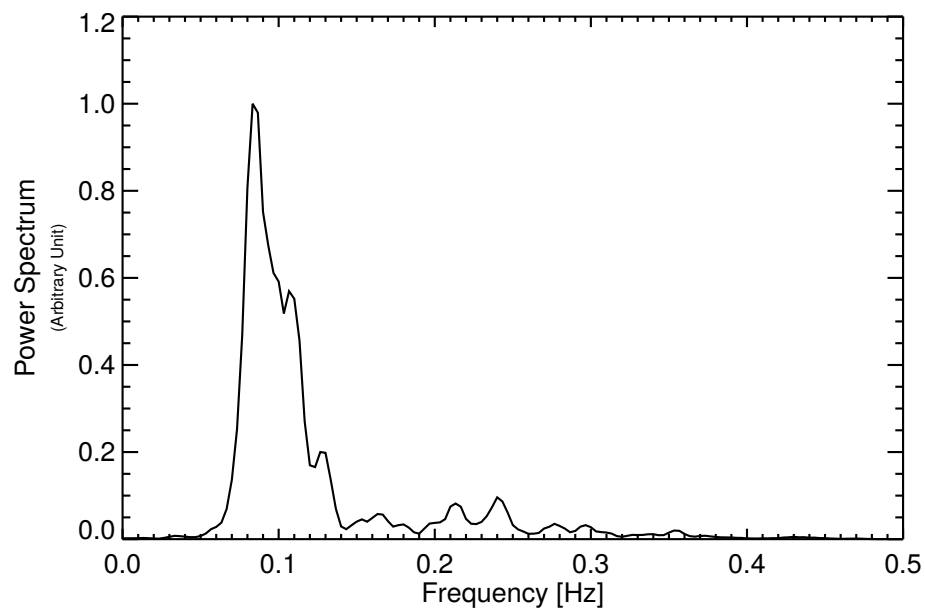


図 3.9: FFT により導出された主脈動の周波数スペクトル「[図 3.7 の事例について]

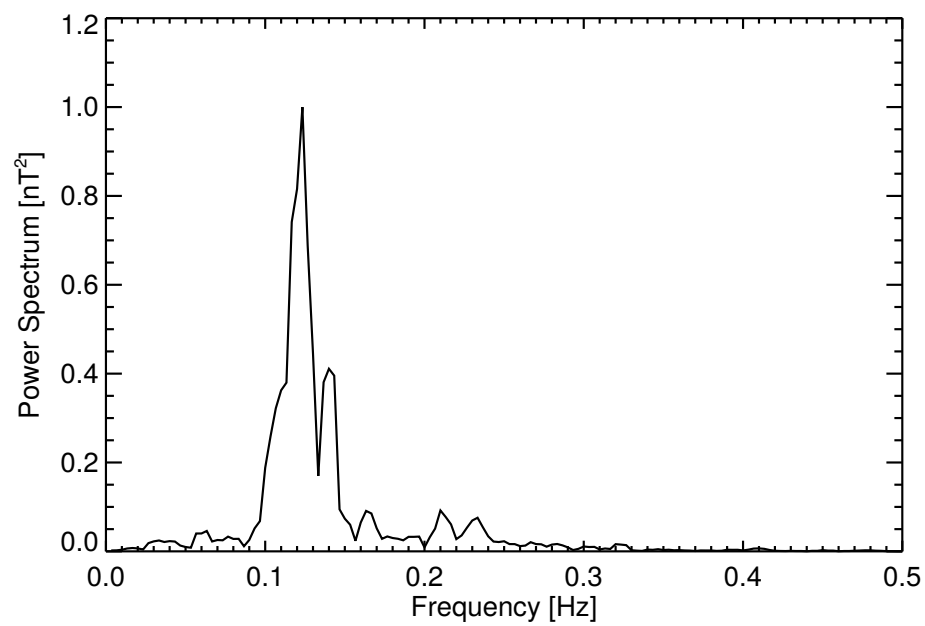


図 3.10: FFT により導出されたコーラスバーストの周波数スペクトル [図 3.4 の事例について]

第4章 結果

本研究では、2010 年 11 月から 2013 年 3 月の間にノルウェー・トロムソに於いて全天 WATEC 並列イメージャから得られた全天画像と、2014 年 6 月から 2015 年 1 月の間に Van Allen Probes に搭載された EFW が取得している Filter Bank Data (FBK データ) の磁場強度を用いて、主脈動とコーラスバーストの周期性を統計的に導出した。

4.1 平均・最頻周波数 周波数分布

主脈動の時間変化を抽出するにあたって、上記の期間中の全天動画を作成し、目視により、PsA イベントのリストアップを行った。解析窓を 5 分として PsA が発生している断面において Keogram を作成し、主脈動の時系列データを抽出した。コーラスバーストについては、EMFISIS で作成した f - t ダイアグラムからコーラスバーストが発生しているイベントのリストアップを行った。その後、主脈動と同様に解析窓を 5 分として対応する FBK データから、コーラス波動の時系列データを抽出した。その後、両者の時系列データの時間微分をとり背景成分を除去することで、主脈動及びコーラスバーストの変動成分のみを抽出し、FFT を用いることで周波数スペクトルを算出した。

上述の手順によって、主脈動については 2079 個、コーラスバーストについては 2296 個の周波数スペクトルを得ることができた。算出された周波数スペクトルの総和を取り、最大値によりパワースペクトルを正規化することで、主脈動及びコーラスバーストの周波数分布を導出した。その結果を図 4.1 に示す。図 4.1 の縦軸は最大値により正規化したパワースペクトルを、横軸は周波数を示している。また、赤線が主脈動、青線がコーラスバーストをそれぞれ示している。

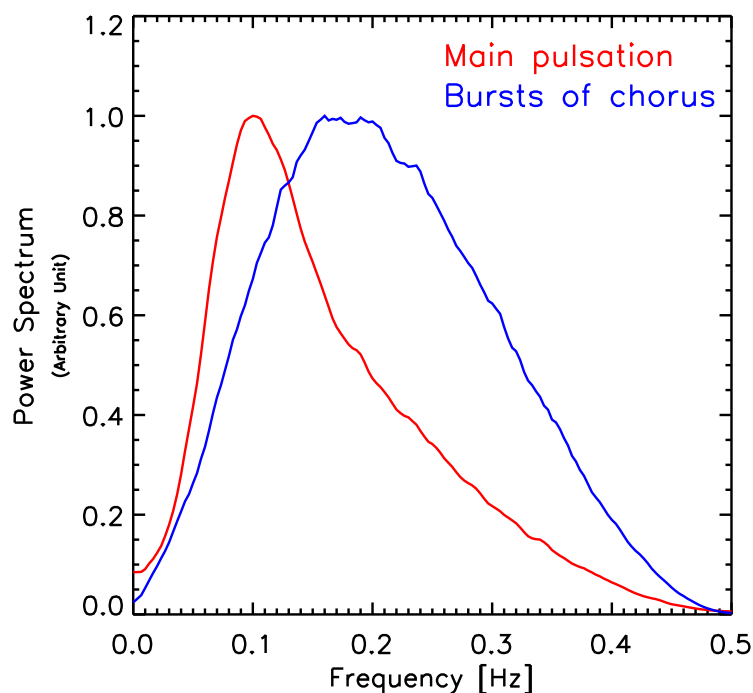


図 4.1: 主脈動、及びコーラスバーストの周波数分布。赤線が主脈動を、青線がコーラスバーストをそれぞれ示している。

主脈動、コーラスバーストの周期性について、それぞれピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を算出した。この結果を表 4.1 にまとめる。

表 4.1: 主脈動及びコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期

	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
主脈動	0.10 Hz	10.0 s	0.12 Hz	8.33 s
コーラスバースト	0.16 Hz	6.25 s	0.15 Hz	6.67 s

両者のピーク周波数・周期、平均周波数・周期及び周波数分布を比較すると、コーラスバーストの周期性が僅かに速い周期性を持っていることがわかる。

Yamamoto [1988] は事例解析として、PsA 主脈動の周期性の解析を行っている。Yamamoto [1988] は PsA の時間変化に対して、自己相関係数を計算することにより、主脈動の On-time 及び Off-time の時間間隔を算出した。また、On-time、Off-time の時間間隔を足し合わせることによって、主脈動の明滅周期も算出した。算出された On-time、Off-time の時間間隔及び明滅周期を図 4.2 に示す。図 4.2 の縦軸は発生率を、横軸は秒を示しており、実線が主脈動の On-time、破線が Off-time、点線が明滅周期をそれぞれ示している。

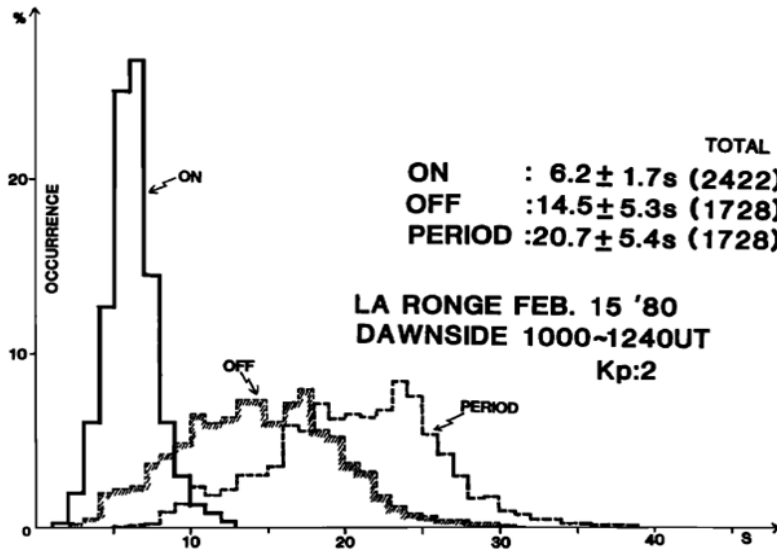


図 4.2: 主脈動の On-time、Off-time の時間間隔及び周期の分布 [Yamamoto, 1988]

On-time、Off-time、明滅周期のそれぞれの平均及び標準偏差は、 6.2 ± 1.7 s、 14.5 ± 5.3 s、 20.7 ± 5.4 s である。この結果と、今回得られた主脈動の解析結果を比較すると、Yamamoto [1988] で得られた結果の方が長い周期性を持っていることがわかる。しかしながら、Yamamoto [1988] は一晩分の事例解析であり、20 s 程度の周期性を持つイベントも今回の結果には十分含まれている。従って、今回得られた結果と Yamamoto [1988] の結果が矛盾しているわけでないと考えられる。

Yamamoto [1988] は On-time、Off-time、明滅周期の分布のばらつきに注目している。On-time の分布は標準偏差が 1.7 s であり、4.0 - 8.0 s に鋭いピークを持っているのに対して、Off-time の分布は標準偏差が 5.3 s と 4.0 - 25.0 s に幅広く分布している。Yamamoto. [1988] は明滅周期が 5.0 - 40.0 s に幅広く分布している原因として、上述の Off-time のばらつきをあげている。その上で、PsA の本質的な時間変化は 4.0 - 8.0 s に鋭いピークを持つ On-time であると主張している。しかしながら、本研究で得られた PsA の明滅周期の周波数分布は幅広く分布していることはなく、0.1 Hz (10.0 s) 付近に鋭いピークを持つ分布となっている。

そこで、今回得られた周波数分布が主脈動及びコーラスバーストの周期と On-time の時間間隔のどちらを示しているのかについての検証を行った。図 4.3 は On-time、Off-time、周期のサンプリング方法を示したものである。図 4.3 に示したように On-time、Off-time の開始時刻と終了時刻をサンプリングし、各々の時間間隔を算出した。また周期については、On-time の開始時刻から次の On-time の開始時刻を周期とした。ここで、縦軸はコーラス波動の磁場強度、横軸は時間を示している。なお、今回の検証については、2014 年 12 月 15 日 10:40 - 10:45 UT におけるコーラス波動の時間変化に対して検証を行った。

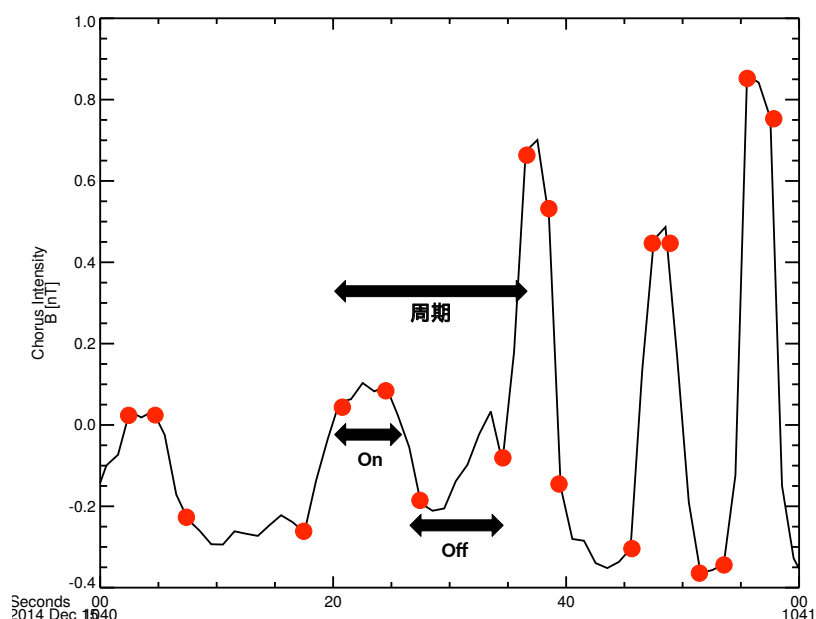


図 4.3: On-time、Off-time、周期のサンプリング方法

図 4.3 に示すように On-time、Off-time の時間間隔、周期をそれぞれサンプリングし、その結果と FFT による周波数スペクトルを比較したものを、図 4.4 に示す。図 4.4 の上段は On-time 及び Off-time の時間間隔、周期のヒストグラムであり、縦軸が最大値により正規化したデータ数を横軸が秒を示しており、青線が On time、緑線が Off time、赤線が周期をそれぞれ示している。図 4.4 の中段は、上段の周期のヒストグラムを周波数のヒストグラムへと変換したもので、縦軸が最大値により正規化したデータ数、横軸が周波数を示している。図 4.4 の下段は FFT により得られた周波数スペクトルで、縦軸が最大値で正規化されたパワースペクトル、横軸が周波数を示している。

まず、サンプリングから得られた平均周期は 10.8 s であり、平均周波数は 0.09 Hz であった。また、サンプリングから得られた周波数のヒストグラムと FFT から得られた周波数分布を比較すると、0.10 - 0.15 Hz にピークを持っており、概形も類似していることがわかる。これらのことから、今回の解析で得られた結果は、On-time の時間間隔を反映したものではなく、周期を反映していることが明らかになった。

今回の結果により、これまで明らかにされていなかった主脈動及びコーラスバーストのピーク周波数・周期及び周波数分布が明らかとなった。

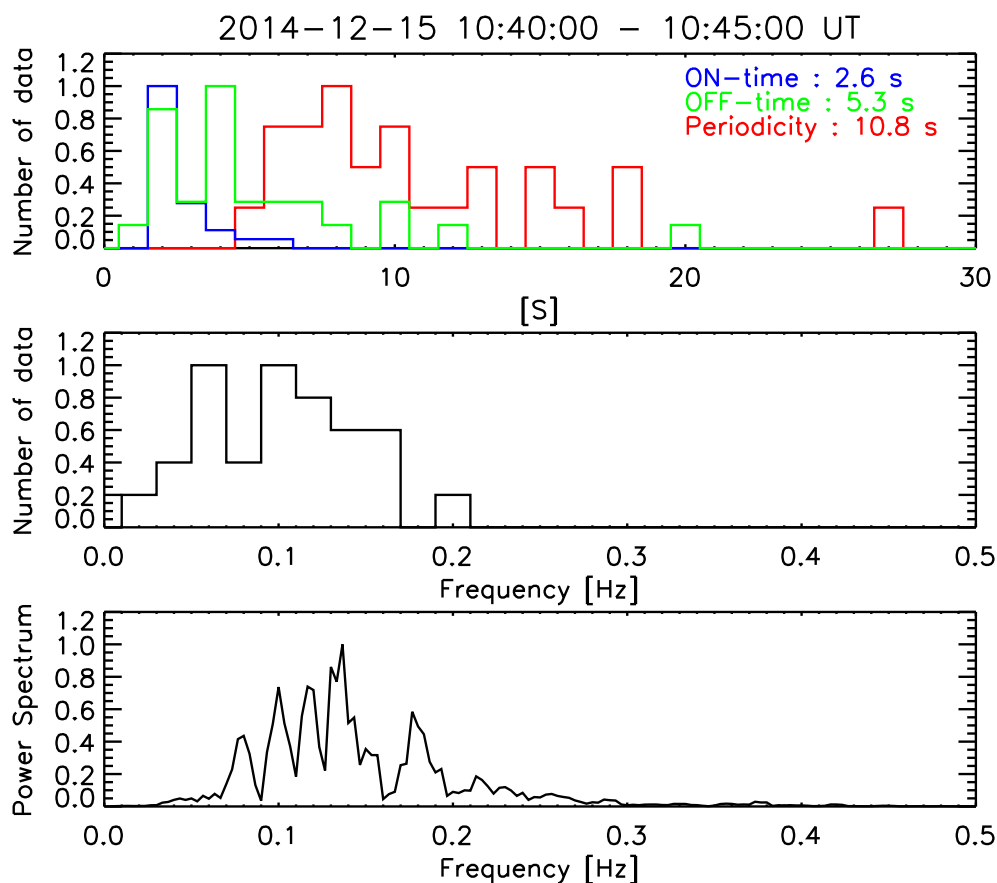


図 4.4: サンプリングから得られた On-time 及び Off-time の時間間隔、周期・周波数のヒストグラム及び FFT から得られた周波数分布。上段が On-time 及び Off-time の時間間隔、周期のヒストグラム、中段が周波数のヒストグラム、下段が FFT により得られた周波数スペクトルをそれぞれ示している。

4.2 主脈動の周期性の形状依存性

続いて、PsA の形状 (Arc 状又は Patch 状) に基づいてイベントを分類し、両者の周波数分布を比較した。その結果を図 4.5 に示す。図 4.1 と同様に縦軸は最大値により正規化されたパワースペクトルを、横軸は周波数を示している。また、赤線が Arc 状、青線が Patch 状の PsA をそれぞれ示してしている。

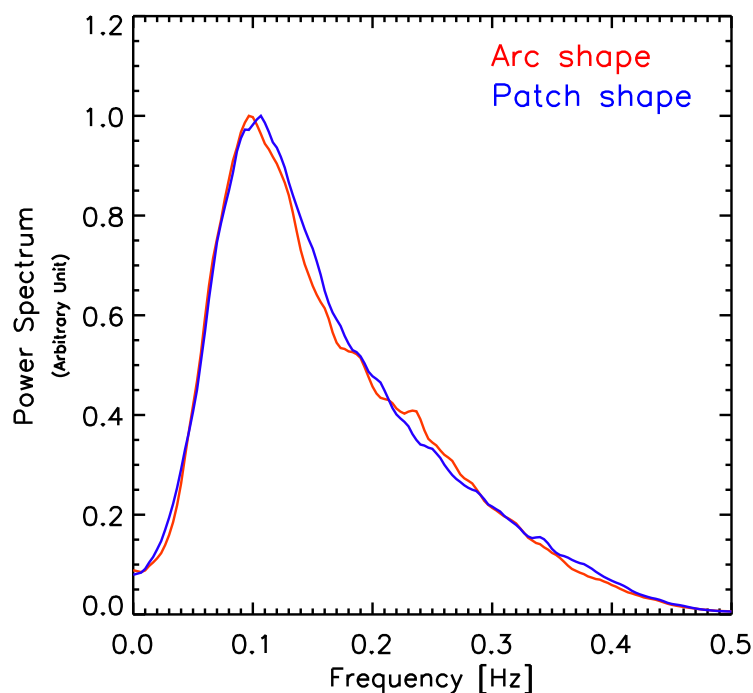


図 4.5: Arc 状 PsA、及び Patch 状 PsA の周波数分布。赤線が Arc 状、青線が Patch 状の PsA をそれぞれ示してしている。

Arc 状 PsA 及び Patch 状 PsA について、それぞれピーク周波数・周期、及び平均周波数・周期を算出した結果を表 4.2 にまとめる。

表 4.2: 主脈動のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の形状変化

形状	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
Arc 状	0.09 Hz	11.6 s	0.11 Hz	9.09 s
Patch 状	0.10 Hz	10.0 s	0.12 Hz	8.33 s

両者の周波数分布を比較すると、その形状はほぼ一致しており、ピーク周波数・周期、及び平均周波数・周期についても大きな変化は見られなかった。これらのことは、PsA の形状により主脈動の周期性が変化しないということを示している。PsA の形状は、磁気赤道面付近でのコーラス波動のソース領域の空間分布を投影したものであることを考えると、上記の事実は、コーラス波動の空間分布がコーラス波動の周期性を決定する要因ではないということを示唆している。

4.3 コーラスバーストの L 値及び MLT 依存性

Van Allen Probes がコーラス波動を観測した L 値によりイベントを分類し、コーラスバーストの周期性が L 値に対して依存しているかどうかについて検証を行った。その結果を図 4.6 に示す。図 4.6 の縦軸は最大値で正規化されたパワースペクトルを、横軸は周波数を示しており、黒線が $L = 4 - 5$ 、緑線が $L = 5 - 6$ 、赤線が $L = 6 - 7$ でのコーラスバーストの周波数分布を示している。

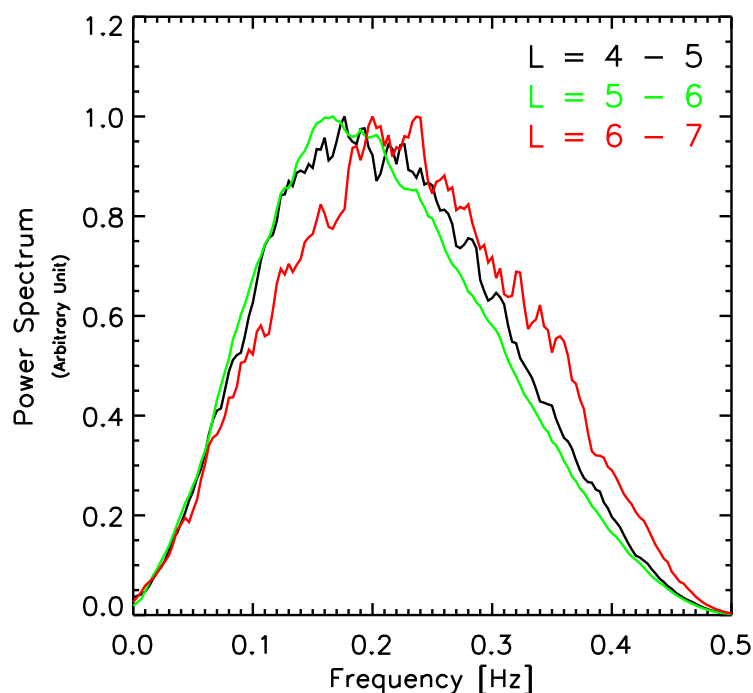


図 4.6: コーラスバーストの周期性の L 値に対する依存性。黒線が $L = 4 - 5$ 、緑線が $L = 5 - 6$ 、赤線が $L = 6 - 7$ でのコーラスバーストの周波数分布を示している。

また、各 L 値においてピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を算出した結果を表 4.3 にまとめる。

表 4.3: コーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の L 値に対する依存性

L 値	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
$L = 4 - 5$	0.17 Hz	5.88 s	0.14 Hz	7.14 s
$L = 5 - 6$	0.16 Hz	6.25 s	0.14 Hz	7.14 s
$L = 6 - 7$	0.20 Hz	5.00 s	0.14 Hz	7.14 s

図 4.6 及び表 4.3 を見ると、コーラスバーストの周期性は L 値に依存していないように見える。

続いて、PsA 及びコーラス波動が観測された磁気地方時 (MLT) ごとにイベントを分類し、主脈動及びコーラスバーストの周期性が、MLT に対して依存しているかどうかについて検証した。その結果を図 4.7 及び 4.8 に示す。図 4.7 及び 4.8 の縦軸は最大値により正規化されたパワースペクトル、横軸は周波数を示しており、黒線が 0 - 1 MLT、青線が 2 - 3 MLT、緑線が 4 - 5 MLT、黄線が 6 - 7 MLT、赤線が 8 - 9 MLT をそれぞれ示している。なお、PsA については 8 - 9 MLT において日照の影響で観測が行えておらず、データは存在しない。

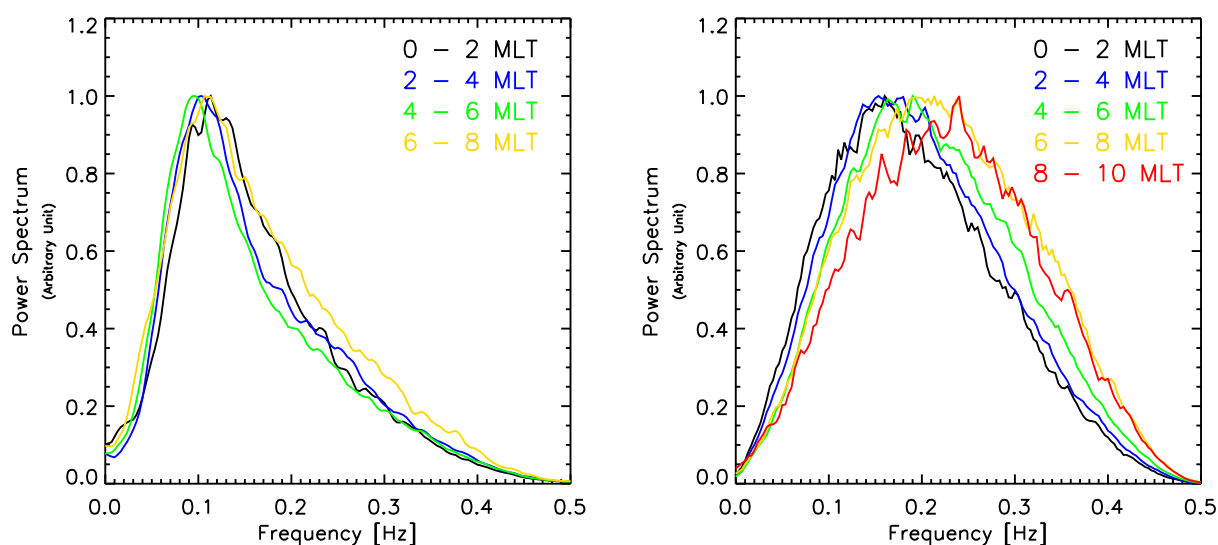


図 4.7: 主脈動の周期性の MLT 変化。黒線が 0 - 1 MLT、青線が 2 - 3 MLT、緑線が 4 - 5 MLT、黄線が 6 - 7 MLT をそれぞれ示している。
図 4.8: コーラスバーストの周期性の MLT 変化。黒線が 0 - 1 MLT、青線が 2 - 3 MLT、緑線が 4 - 5 MLT、黄線が 6 - 7 MLT、赤線が 8 - 9 MLT をそれぞれ示している。

また、各 MLT におけるピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を算出した結果を表 4.4 から 4.5 にまとめる。

表 4.4: 主脈動のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の MLT 変化

MLT	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
0 - 2 MLT	0.11 Hz	9.09 s	0.11 Hz	9.09 s
2 - 4 MLT	0.10 Hz	10.0 s	0.11 Hz	9.09 s
4 - 6 MLT	0.09 Hz	11.1 s	0.11 Hz	9.09 s
6 - 8 MLT	0.10 Hz	10.0 s	0.13 Hz	7.69 s

表 4.5: コーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の MLT 変化

MLT	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
0 - 2 MLT	0.16 Hz	6.25 s	0.14 Hz	7.14 s
2 - 4 MLT	0.15 Hz	6.67 s	0.14 Hz	7.14 s
4 - 6 MLT	0.19 Hz	5.26 s	0.14 Hz	7.14 s
6 - 8 MLT	0.21 Hz	4.76 s	0.15 Hz	6.67 s
8 - 10 MLT	0.24 Hz	4.17 s	0.13 Hz	7.69 s

両者の周波数分布に注目してみると、主脈動は MLT に対してほぼ一定であるのに対して、コーラスバーストについては MLT が遅くなる (朝側にいく) につれて、高い周波数で変動する傾向にあることがわかる。

以上のことから、一見すると、コーラスバーストの周期性は L 値及び MLT に対して依存性を持つように思われる。しかしながら、Van Allen Probes の軌道は L 値が大きい位置では、MLT が遅い位置をとる。図 4.9 に Van Allen Probes によるコーラス波動の観測位置を示す。図 4.9 の縦軸は L 値を、横軸は MLT を示しており、赤線はトロムソにおける L 値を示している。

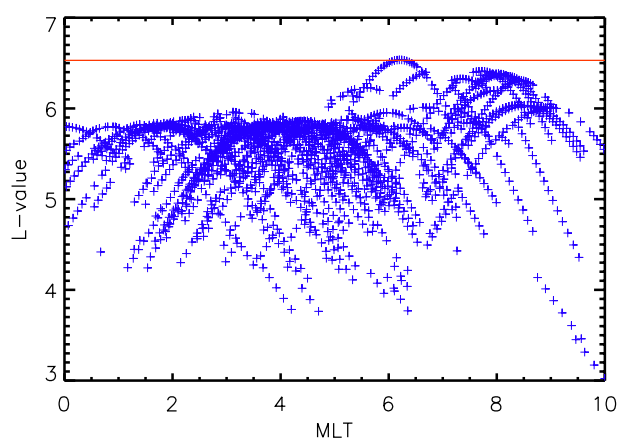


図 4.9: Van Allen Probes によるコーラス波動の観測位置

図 4.9 から分かるように、L 値が大きい位置 (例えば L 値が 6 以上) では Van Allen Probes はほぼ朝方においてのみ観測を行っており、図 4.6 及び図 4.8 からコーラスバーストの周期性の L 値及び MLT に対する依存性を見出すことは困難である。

そこで、まず各 L 値について MLT による分類を行い、コーラスバーストが各 L 値において MLT に対して依存しているのかの検証を行った。その結果を図 4.10 から 4.12 に示す。図 4.10 から 4.12 の縦軸は最大値により正規化されたパワースペクトルを、横軸は周波数を

示しており、黒線が 0 - 1 MLT、青線が 2 - 3 MLT、緑線が 4 - 5 MLT、黄線が 6 - 7 MLT、赤線が 8 - 9 MLT をそれぞれ示している。

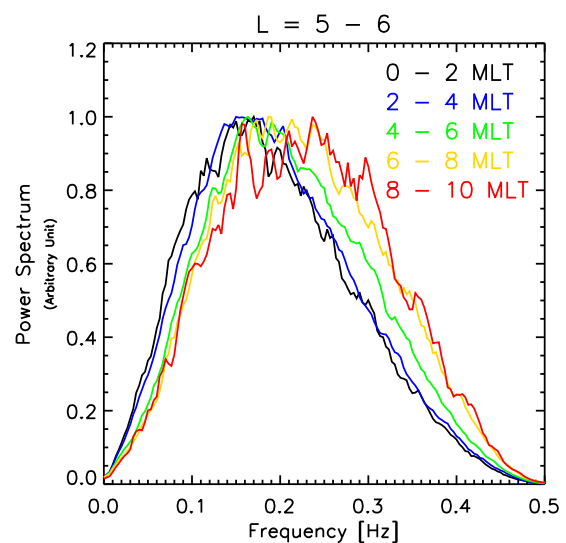
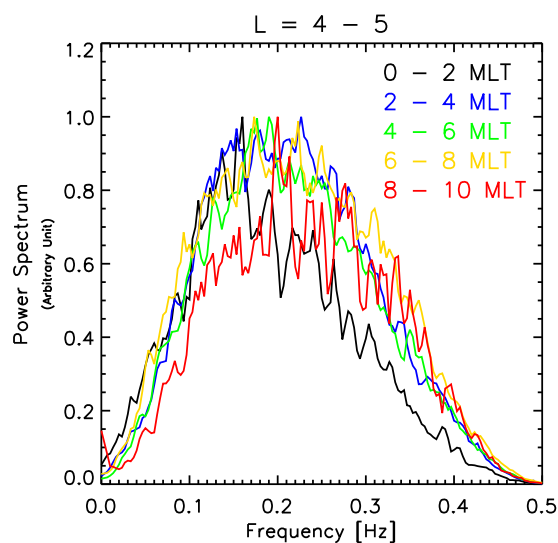


図 4.10: $L = 4 - 5$ におけるコーラスバーストの MLT 変化。黒線が 0 - 1 MLT、青線が 2 - 3 MLT、緑線が 4 - 5 MLT、黄線が 6 - 7 MLT、赤線が 8 - 9 MLT をそれぞれ示している。

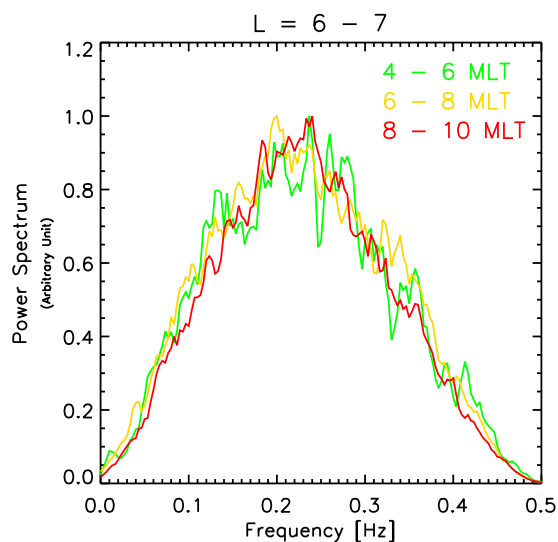


図 4.12: $L = 6 - 7$ におけるコーラスバーストの MLT 変化。緑線が 4 - 5 MLT、黄線が 6 - 7 MLT、赤線が 8 - 9 MLT をそれぞれ示している。

各 L 値において MLT ごとにピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を算出した結果を表 4.6 から 4.8 にまとめる。

表 4.6: $L = 4 - 5$ におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の MLT 変化

MLT	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
0 - 2 MLT	0.16 Hz	6.25 s	0.12 Hz	8.33 s
2 - 4 MLT	0.23 Hz	4.35 s	0.14 Hz	7.14 s
4 - 6 MLT	0.19 Hz	5.26 s	0.13 Hz	7.69 s
6 - 8 MLT	0.17 Hz	5.88 s	0.14 Hz	7.14 s
8 - 10 MLT	0.20 Hz	5.00 s	0.11 Hz	9.09 s

表 4.7: $L = 5 - 6$ におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の MLT 変化

MLT	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
0 - 2 MLT	0.17 Hz	5.88 s	0.14 Hz	7.14 s
2 - 4 MLT	0.15 Hz	6.67 s	0.14 Hz	7.14 s
4 - 6 MLT	0.16 Hz	6.25 s	0.14 Hz	7.14 s
6 - 8 MLT	0.18 Hz	5.56 s	0.14 Hz	7.14 s
8 - 10 MLT	0.24 Hz	4.17 s	0.14 Hz	7.14 s

表 4.8: $L = 6 - 7$ におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の MLT 変化

MLT	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
4 - 6 MLT	0.24 Hz	4.17 s	0.13 Hz	7.69 s
6 - 8 MLT	0.20 Hz	5.00 s	0.14 Hz	7.14 s
8 - 10 MLT	0.24 Hz	4.17 s	0.13 Hz	7.69 s

各 L 値ごとにコーラスバーストの周期性の MLT 変化に注目すると、平均周波数・周期に大きな違いはみられなかった。しかしながら、ピーク周波数・周期については、 $L = 4 - 5$ 及び $L = 5 - 6$ において、MLT が遅くなる (朝方になる) につれて、高い周波数で変動する傾向にあることが見て取れる。また、 $L = 6 - 7$ においては MLT が早い位置でのデータ数が十分でなかったために、MLT 変化を確認することはできなかった。

以上のことから、コーラスバーストは MLT が遅くなる (朝方になる) につれて、高い周波数で変動する傾向にあることがわかった。

続いて、各 MLT について L 値による分類を行い、コーラスバーストが各 MLT において L 値に対して依存しているのかの検証を行った。その結果を図 4.13 から 4.17 に示す。図 4.13 から 4.17 の縦軸は最大値により正規化されたパワースペクトルを、横軸は周波数を示しており、黒線が $L = 4 - 5$ 、緑線が $L = 5 - 6$ 、赤線が $L = 6 - 7$ をそれぞれ示している。

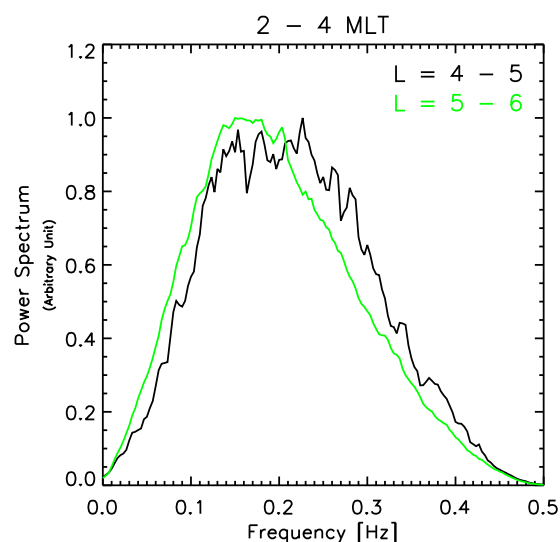
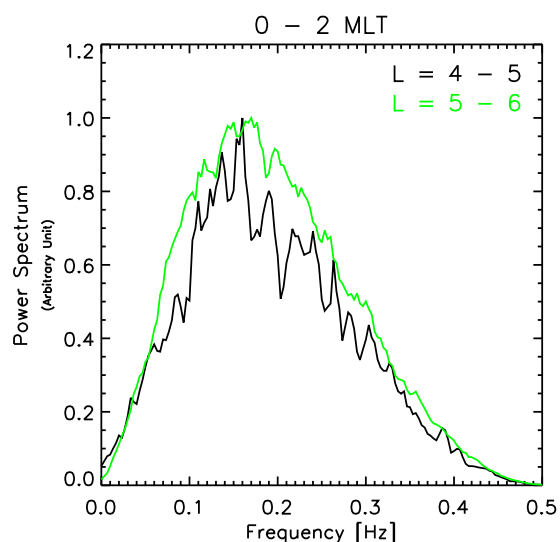


図 4.13: 0 - 2 MLT におけるコーラスバーストの L 値変化。黒線が $L = 4 - 5$ 、緑線が $L = 5 - 6$ をそれぞれ示している。

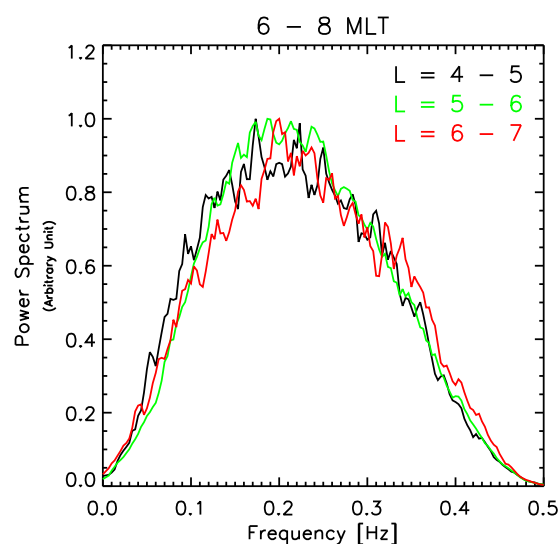
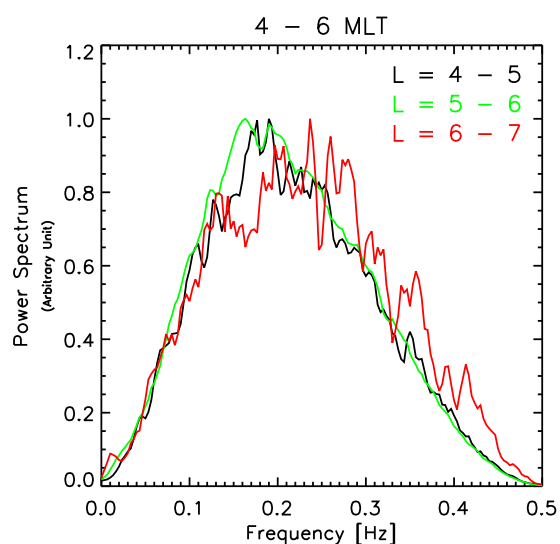


図 4.15: 4 - 6 MLT におけるコーラスバーストの L 値変化。黒線が $L = 4 - 5$ 、緑線が $L = 5 - 6$ 、赤線が $L = 6 - 7$ をそれぞれ示している。

いる。

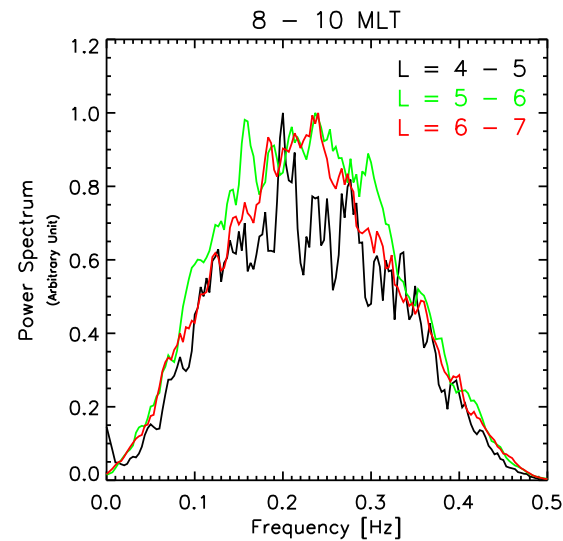


図 4.17: 8 - 10 MLT におけるコーラスバーストの L 値変化。黒線が $L = 4 - 5$ 、緑線が $L = 5 - 6$ 、赤線が $L = 6 - 7$ をそれぞれ示している。

各 MLT において L 値ごとにピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を算出した結果を表 4.9 から 4.13 にまとめる。

表 4.9: 0 - 2 MLT におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期および平均周波数・周期の L 値変化

L 値	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
L = 4 - 5	0.16 Hz	6.25 s	0.12 Hz	8.33 s
L = 5 - 6	0.17 Hz	5.88 s	0.14 Hz	7.14 s

表 4.10: 2 - 4 MLT におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の L 値変化

L 値	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
L = 4 - 5	0.22 Hz	4.55 s	0.14 Hz	7.14 s
L = 5 - 6	0.15 Hz	6.67 s	0.14 Hz	7.14 s

表 4.11: 4 - 6 MLT におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の L 値変化

L 値	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
L = 4 - 5	0.19 Hz	5.26 s	0.13 Hz	7.69 s
L = 5 - 6	0.16 Hz	6.25 s	0.14 Hz	7.14 s
L = 6 - 7	0.24 Hz	4.17 s	0.13 Hz	7.69 s

表 4.12: 6 - 8 MLT におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の L 値変化

L 値	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
L = 4 - 5	0.17 Hz	5.88 s	0.14 Hz	7.14 s
L = 5 - 6	0.19 Hz	5.26 s	0.14 Hz	7.14 s
L = 6 - 7	0.20 Hz	5.00 s	0.14 Hz	7.14 s

表 4.13: 8 - 10 MLT におけるコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期の L 値変化

L 値	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
L = 4 - 5	0.20 Hz	5.00 s	0.11 Hz	9.09 s
L = 5 - 6	0.24 Hz	4.17 s	0.14 Hz	7.14 s
L = 6 - 7	0.24 Hz	4.17 s	0.13 Hz	7.69 s

各 MLT ごとにコーラスバーストの周期性の L 値変化に注目すると、L 値が大きくなるにつれて、高い周波数で変動する傾向にあることが見て取れる。以上より、コーラスバーストの周期性は L 値及び MLT の両方に依存しており、L 値が大きくなる（高緯度に行く）ほど、MLT が遅くなる（朝方に行く）ほど高い周波数で変動する傾向にあることが明らかになった。

第5章 考察

図 4.1 で得られた主脈動及びコーラスバーストの周波数分布に注目すると、コーラスバーストに見られる $0.2 - 0.4 \text{ Hz}$ ($2.5 - 5.0 \text{ s}$) の速い時間変化が、主脈動においてはほとんど見受けられないという違いが見られる。この差異を生み出す原因として、電子が磁気赤道面から地球電離圏に到達するまでの飛行時間である Time of flight (TOF) 及び全天 WATEC 並列イメージャが観測している 557.7 nm の発光に伴う酸素原子の Life time の時定数の分散が考えられる。

5.1 Time of flight (TOF) の分散

TOF は電子のエネルギーに依存しており、エネルギーの高い電子ほど TOF は短くなる。また、PsA の発光に寄与している電子は $5 - 40 \text{ keV}$ のエネルギー帯のものであると言われている [Sandahl et al., 1980; McEwen et al., 1981]。図 5.1 に PsA 発生時の降下電子のエネルギーフラックスを示す [Sandahl et al., 1980]。図 5.1 の縦軸は降下電子のエネルギーフラックスを、横軸は電子のエネルギーを示しており、白丸が PsA の On-time 中の電子のエネルギーフラックスを、黒丸が PsA の Off-time 中の電子のエネルギーフラックスをそれぞれ示している。図 5.1 に示されている 4 つのイベント全てにおいて、 $5 - 40 \text{ keV}$ のエネルギー帯でエネルギーフラックスが上昇しているのが見て取れる。この結果は PsA の発光に主に寄与している電子のエネルギー帯は $5 - 40 \text{ keV}$ であることを示している。

その他にも、Miyoshi et al. [2014] は PsA の発生時に数 keV から 100 keV の電子の降り込みがあったことを観測的に示している。このように、PsA の発光には様々なエネルギーの電子が寄与しており、その結果 TOF に分散が生じる。

Miyoshi et al. [2010] は低高度衛星観測から TOF の推定を行った。図 5.2 はれいめい衛星によって観測された PsA 発生時の電子のエネルギー分散を示している。図 5.2 の縦軸は電子のエネルギーを、横軸は電子がれいめい衛星に到達した時間を示しており、赤点が実観測データを、各曲線がコーラス波動の各周波数による降下電子のエネルギーの分散を示している。ここで、れいめい衛星の実観測データに注目すると、 2 keV と 10 keV の電子の間には、れいめい衛星に到達するまでに約 0.5 秒 の時間差が生じていることが分かる。このような TOF の分散によって、磁気赤道面におけるコーラス波動の素早い変化に対して、地球電

離圈側の PsA は応答することができない可能性が考えられる。

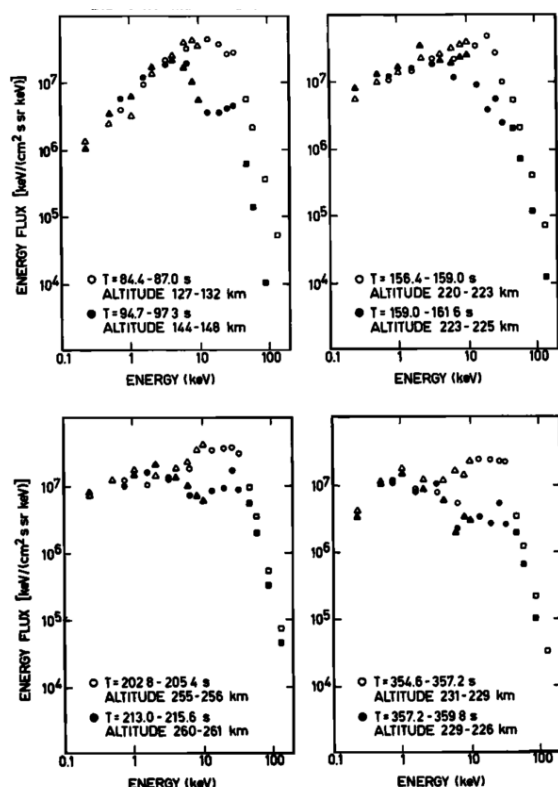


図 5.1: PsA 発生時の降下電子のエネルギーフラックス [Sandahl et al., 1980]

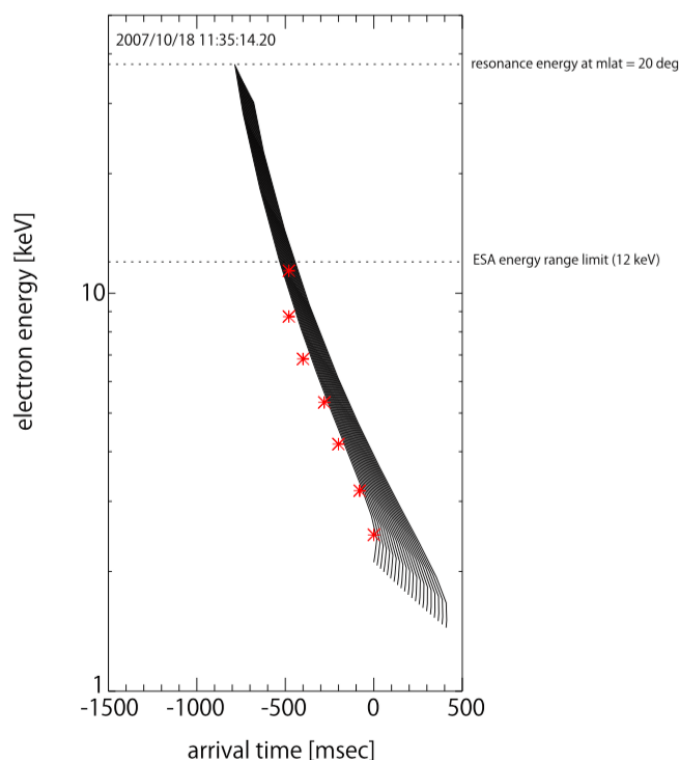


図 5.2: れいめい衛星によって観測された電子のエネルギー分散 [Miyoshi et al., 2010]

5.2 557.7 nm の発光に伴う酸素原子の Life time の分散

本研究で用いた全天 WATEC 並列イメージャは波長 557.7 nm の発光を観測しており、波長 557.7 nm の発光は電子の降り込みから約 1 秒後に発光する。また、電子の降り込み後、即時発光するような波長 (427.8 nm など) の光と比較して、発光後消光までの時間 (Life time) も長い。その様子を図 5.3 に示す。図 5.3 の縦軸は発光強度を、横軸は時間 (秒) をそれぞれ示している。また、図中の黒丸は 427.8 nm の発光の時間変化を、白丸・三角・バツは 527.8 nm の発光の時間変化をそれぞれ示している。図 5.3 から分かるように、557.7 nm の波長の発光は即時発光する 427.8 nm の波長の発光と比較して、約 1 秒遅れて発光し、消光までの時間も 1.0 - 1.5 秒ほどである。

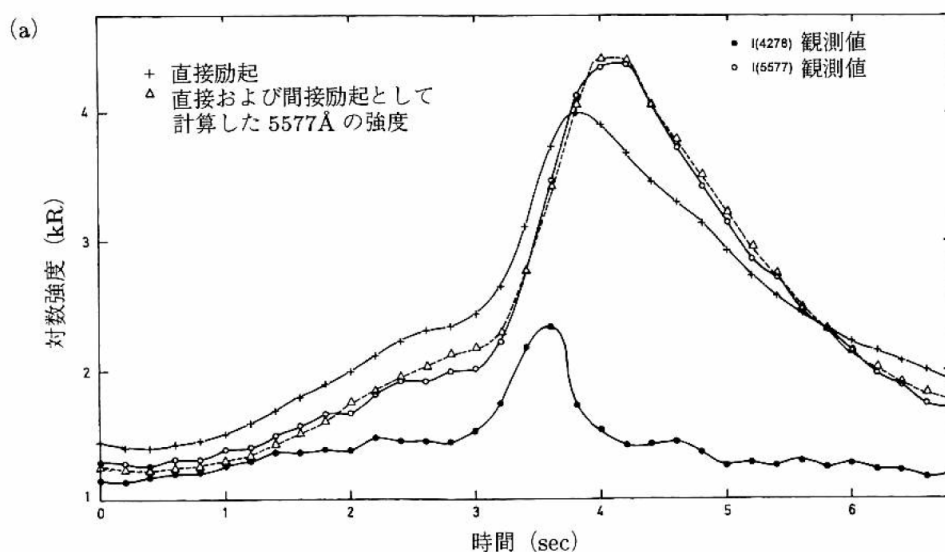


図 5.3: 427.8 nm と 557.7 nm の比較 [Henriksen, 1974]

Brekke and Henriksen [1972] はノルウェー・トロムソにおいて波長 427.8 nm の発光の時間変化と波長 557.7 nm の発光の時間変化に対して、相関解析を行うことで、PsA 発生時の波長 557.7 nm の発光に伴う酸素原子の Life time の分布を導出した。その結果を図 5.4 に示す。図 5.4 の縦軸はデータ数を、横軸は Life time をそれぞれ示している。

図 5.4 からわかるように、波長 557.7 nm の発光の Life time は 0.3 - 1.3 秒に広く分布している。このような Life time の分散によって、磁気赤道面におけるコーラス波動の素早い変化に対して、地球電離圏側の PsA は応答することができない可能性が考えられる。

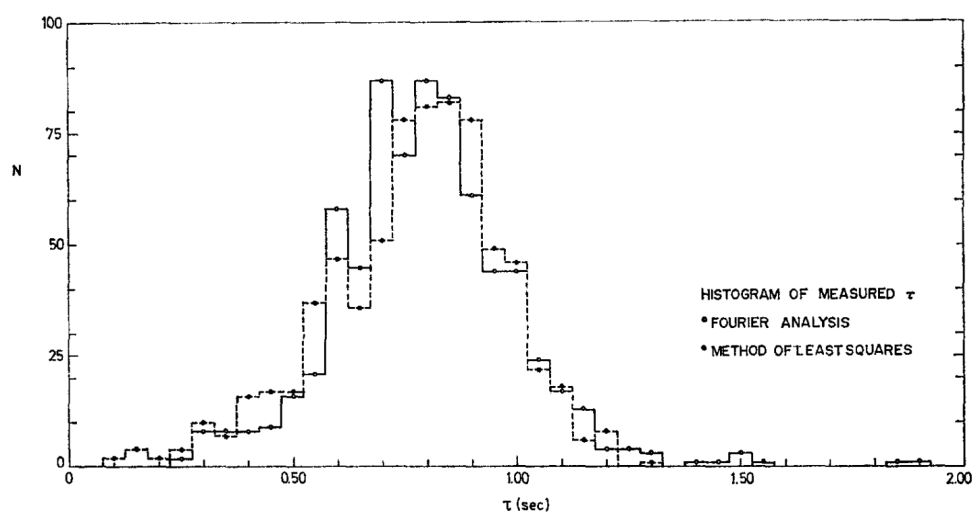


図 5.4: PsA 発生時の波長 557.7 nm の発光に伴う酸素原子の Life time の分布 [Brekke and Henriksen, 1972]

5.3 TOF と Lifetime の影響

5.1 及び 5.2 で述べた、TOF と波長 557.7 nm の発光の Life time の双方が持つ分散が、実際のコーラスバーストの時間変化に対して、どのような影響を与えるのかについてシミュレーションを行った。以下、シミュレーションのデータセットについて記す。

まず、以下の式を用いてバウンス周期を求めた。

$$\tau = (3.7 - 1.6\sin \alpha_{eq})LR_E \frac{m^{1/2}}{w} \quad (5.1)$$

ここで、 α_{eq} は磁気赤道面におけるピッチ角、L は L 値、 R_E は地球半径、m は電子の質量、w は電子の運動量をそれぞれ示している。バウンス周期は電子がミラーポイント間を往復する時間であるので、磁気赤道面から電離圏までに電子がかかる TOF を以下のように仮定した。

$$TOF = 0.25 \times \tau \quad (5.2)$$

上記のように設定した TOF を PsA の発光に最も寄与している 5 - 40 keV の電子に対して表 5.1 に示す割合で 5 keV ごとに算出した。

表 5.1: シミュレーションに用いた電子のエネルギーとその割合

エネルギー	割合
5 keV	10 %
10 keV	25 %
15 keV	15 %
20 keV	15 %
25 keV	10 %
30 keV	10 %
35 keV	10 %
40 keV	5 %

また、Life time については、*Brekke and Henriksen [1972]* で示されたものを、そのまま用いた。

求めた TOF 及び Life time の分散を FBK データから得られたコーラス波動のデータに当てはめることで、波長 557.7 nm の発光の時間変化を再現した。その結果を図 5.5 に示す。図 5.5 の上段は FBK データから得られたコーラス波動の時間変化であり、縦軸が磁場強度を、横軸が時間をそれぞれ示している。中段はコーラス波動の時間変化に対して、TOF の分散を考慮した電子の降り込み後、即時に発光する波長の光の時間変化であり、縦軸が輝度値を、横軸が時間をそれぞれ示している。下段は中図の時間変化に対して、Life time の分

散を考慮した波長 557.7 nm の発光の時間変化であり、縦軸が輝度値を、横軸が時間をそれぞれ示している。図 5.5 の上段と下段を比較すると、上段で示されているような高い周波数の時間変化が、下段では潰れてしまっていることが見て取れる。

上記 2 つの時間変化に対して、FFT により周波数スペクトルを算出した。その結果を図 5.6 に示す。図 5.6 の縦軸はパワースペクトルを、横軸は周波数をそれぞれ示しており、青線がコーラスバーストを、赤線が波長 557.7 nm の発光をそれぞれ示している。両者の周波数スペクトルに注目すると、コーラスバーストの周波数スペクトルでは高いパワーを示している 0.2 - 0.5 Hz の周波数帯の変動が、波長 557.7 nm の発光においてはパワーを失っていることが見て取れる

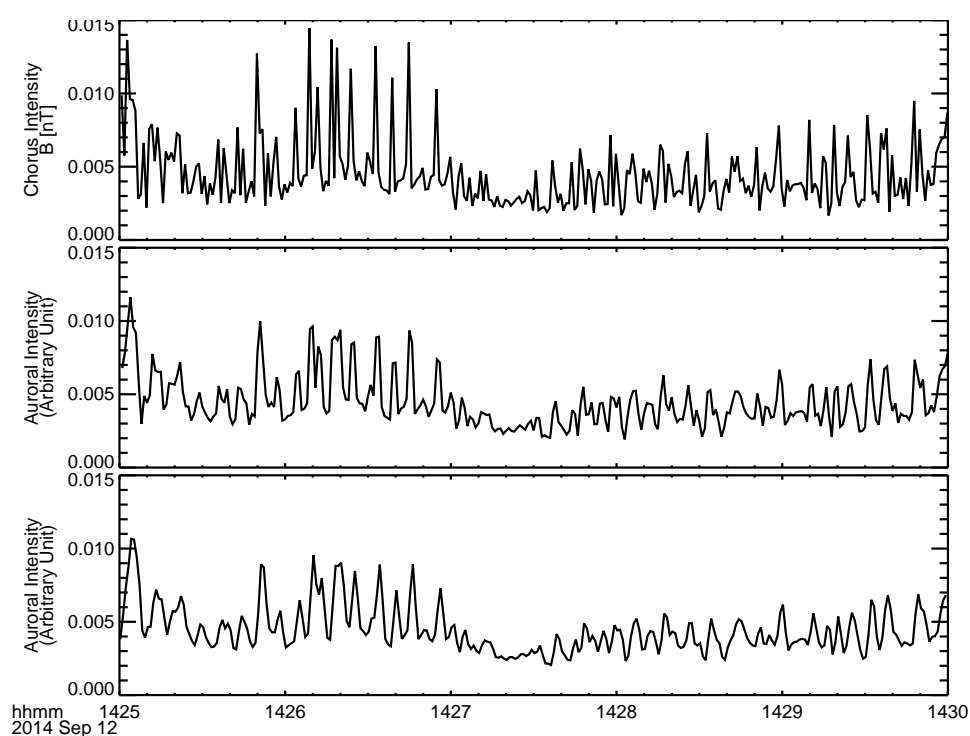


図 5.5: TOF 及び Life time の分散から再現された波長 557.7 nm の発光の時間変化

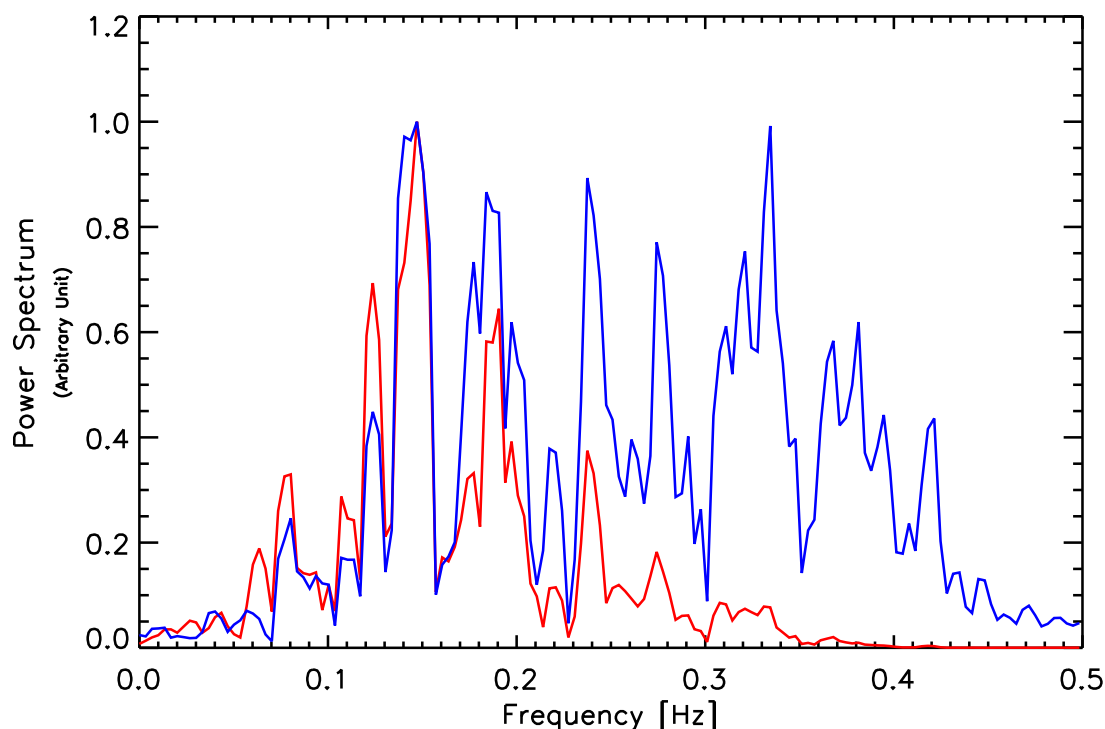


図 5.6: FFT により算出されたコーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光の時間変化の周波数スペクトル。青線がコーラスバーストを、赤線が波長 557.7 nm の発光をそれぞれ示している。

従って、主脈動及びコーラスバーストの周波数分布の間に見られた、コーラスバーストで見られる 0.2 - 0.4 Hz (2.5 - 5.0 s) の速い時間変化が、主脈動においてはほとんど見受けられないという違いは、TOF 及び Life time の分散によって生じていると考えられる。

そこで、本研究で得られたコーラス波動の全イベントに対して、TOF と Life time の分散の影響を考慮し、波長 557.7 nm の発光の周波数分布を導出した。その結果を図 5.7 に示す。図 5.7 の縦軸はパワースペクトルを、横軸は周波数をそれぞれ示しており、赤線が主脈動、青線がコーラスバースト、緑線が波長 557.7 nm の発光をそれぞれ示している。

各周波数分布のピーク周波数及びピーク周期及び平均周波数・周期を算出した結果を表 5.2 に示す。各周波数分布のピーク周波数・周期のみを比較すると、波長 557.7 nm の発光はコーラスバーストと比較して、ほぼ同様の周波数及び周期を示している。しかしながら、各周波数分布の平均周波数・周期を比較すると、主脈動と波長 557.7 nm の発光の周期性は非常に似通っている事がわかる。また、周波数分布の概形に注目すると、波長 557.7 nm の発光の周波数分布においては、0.2 - 0.5 Hz の周波数帯についてコーラスバーストと比較して、パワースペクトルが明らかに小さくなることとが分かる。

以上のことより、主脈動及びコーラスバーストの差異は、PsA の発光に寄与している電

子が磁気赤道面から電離圏に降り込むまでの飛行時間である TOF と全天 WATEC 並列イメージャが観測している波長 557.7 nm の発光に伴う酸素原子の Life time の時定数の分散によって生まれたことが明らかとなった。

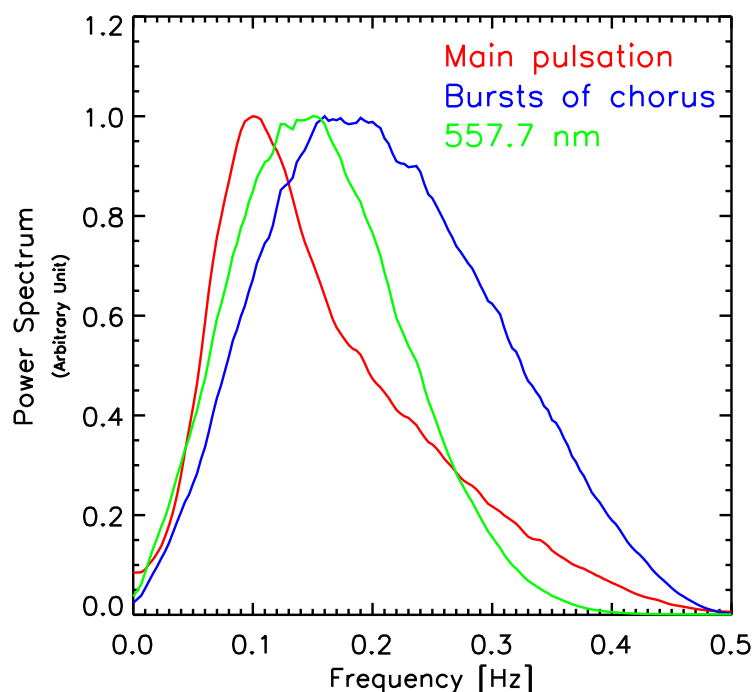


図 5.7: 主脈動、コーラスバースト、及び再現された波長 557.7 nm の発光の周波数分布。赤線が主脈動、青線がコーラスバースト、緑線が波長 557.7 nm の発光をそれぞれ示している。

表 5.2: 主脈動、コーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期

	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
主脈動	0.10 Hz	10.0 s	0.12 Hz	8.33 s
コーラスバースト	0.16 Hz	6.25 s	0.15 Hz	6.67 s
波長 557.7 nm の発光	0.15 Hz	6.67 s	0.13 Hz	7.69 s

5.4 L 値ごとの TOF と Lifetime の影響

続いて、コーラス波動が観測された L 値ごとにイベントを分類し、節 5.3 で行った処理と同様の処理をすることで、各 L 値における TOF と Life time の影響を比較した。図 5.8、5.9 及び 5.10 に主脈動、各 L 値におけるコーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光の周波数分布を示す。

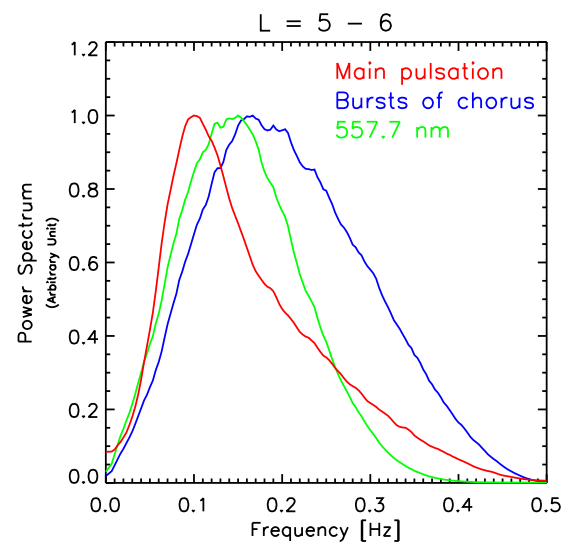
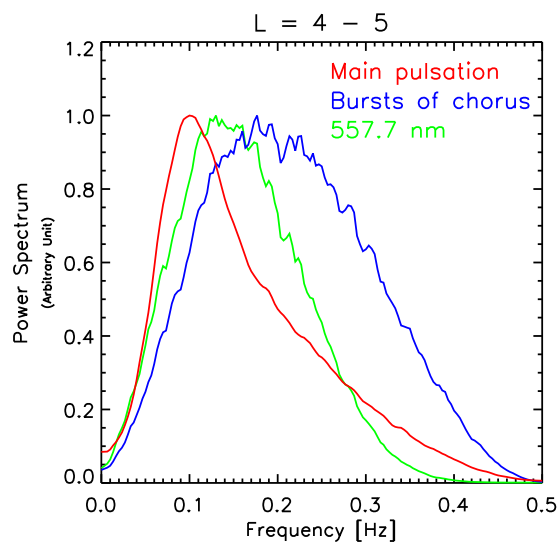


図 5.8: 主脈動、 $L = 4 - 5$ におけるコーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光の周波数分布。赤線が主脈動、青線が $L = 4 - 5$ でのコーラスバースト、緑線が波長 557.7 nm の発光をそれぞれ示している。

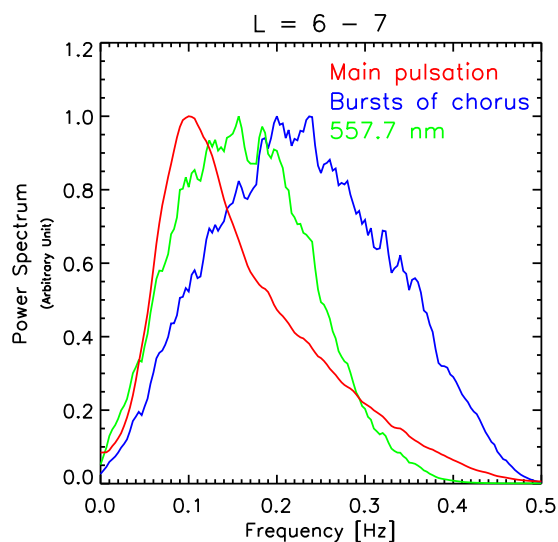


図 5.10: 主脈動、 $L = 6 - 7$ におけるコーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光の周波数分布。赤線が主脈動、青線が $L = 6 - 7$ でのコーラスバースト、緑線が波長 557.7 nm の発光をそれぞれ示している。

また、表 5.3 から 5.5 に各周波数分布のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を算出した結果を示す。

表 5.3: 主脈動、 $L = 4 - 5$ におけるコーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期

	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
主脈動	0.10 Hz	10.0 s	0.12 Hz	8.33 s
コーラスバースト	0.17 Hz	5.88 s	0.14 Hz	7.14 s
波長 557.7 nm の発光	0.13 Hz	7.69 s	0.12 Hz	8.33 s

表 5.4: 主脈動、 $L = 5 - 6$ におけるコーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期

	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
主脈動	0.10 Hz	10.0 s	0.12 Hz	7.14 s
コーラスバースト	0.16 Hz	6.25 s	0.14 Hz	7.14 s
波長 557.7 nm の発光	0.15 Hz	6.67 s	0.12 Hz	8.33 s

表 5.5: 主脈動、 $L = 6 - 7$ におけるコーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期

	ピーク周波数	ピーク周期	平均周波数	平均周期
主脈動	0.10 Hz	10.0 s	0.12 Hz	8.33 s
コーラスバースト	0.20 Hz	5.00 s	0.14 Hz	7.14 s
波長 557.7 nm の発光	0.16 Hz	6.25 s	0.12 Hz	8.33 s

各 L 値について、主脈動、コーラスバースト及び波長 557.7 nm の発光のピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を比較すると、主脈動と波長 557.7 nm の発光の周期性は非常に似通っていることがわかる。

従って、TOF 及び Life time の影響は L 値に依存せず、コーラスバーストの 0.2 - 0.5 Hz という速い時間変化を鈍らせることが分かった。

5.5 主脈動と再現された波長 557.7 nm の差異

しかしながら、図 5.7 から 5.10 の各周波数分布を比較すると、主脈動が再現された波長 557.7 nm よりも僅かに長い周期性を持っていることがわかる。この差異についても考察する。

本研究で用いたデータセットは図 4.9 から分かるように、地上光学観測と衛星電磁場観測の観測位置が異なっている。また、解析期間についても地上光学観測は 2010 年 11 月 か

ら 2013 年 3 月の期間のデータを、衛星電磁場観測については 2014 年 6 月 から 2015 年 1 月 の期間のデータを用いたように、異なる期間のデータを用いて解析を行っている。加えて、今回のシミュレーションで与えた降下電子のエネルギーや Life time の分布は常に一定であったが、実際には各イベントごとに異なる分布になるはずである。上記に挙げた要因により、主脈動と再現された波長 557.7 nm の周波数分布に差異が生まれたと考えられる。

第6章 まとめ

本研究では今まで統計的に示されていなかった主脈動及びコーラスバーストの周期性について、2010 年 11 月から 2013 年 3 月の期間に全天 WATEC 並列イメージャから得られた全天画像データ及び 2014 年 6 月から 2015 年 1 月の期間に Van Allen Probes から得られた磁場データを用いて、主脈動及びコーラスバーストの周期性についての統計的な解析を行った。その結果、今まで明らかになっていなかった主脈動及びコーラスバーストのピーク周波数及びピーク周期を導出し、両者の周波数分布の関係を統計的に示した。本研究で得られた結果について、以下にまとめる。

1. 主脈動及びコーラスバーストのピーク周波数・周期及び平均周波数・周期を世界で初めて算出した。その結果、主脈動についてはピーク周波数が 0.10 Hz、ピーク周期が 10.0 s であり、平均周波数は 0.12 Hz、平均周期は 8.33 s であった。またコーラスバーストについてはピーク周波数が 0.16 Hz、ピーク周期が 6.25 s であり、平均周波数は 0.15 Hz、平均周期は 6.67 s であった。
2. 主脈動及びコーラスバーストの周波数分布を統計的に導出した。その結果両者の周波数分布の概形は良い一致を示しており、主脈動はコーラスバーストと密接に関連していることを統計的に示した。
3. 主脈動の周期性が PsA の形状に対して、どのような依存性を持っているのか検証を行った。PsA を Arc 状と Patch 状に分類し、比較した結果、両者の周波数分布、ピーク周波数・周期及び平均周波数・周期に大きな差は見られず、主脈動の周期性は PsA の形状に依存していないことが分かった。このことは、主脈動及びコーラスバーストの周期性はコーラス波動のソース領域の空間分布に依存していないことを示唆している。
4. コーラスバーストの周期性が L 値・MLT に対して、どのような依存性を持っているのか検証を行った。その結果、コーラスバーストの周期性は L 値・MLT の両方に依存しており、L 値が大きくなる（高緯度に行く）ほど、MLT が遅くなる（朝方に行く）ほど、高い周波数で変動する傾向にあることが明らかになった。

5. TOF 及び 波長 557.7 nm の発光の Life time の分散が主脈動の周期性にどのような影響を及ぼすかについて、コーラス波動の実データを用いてシミュレーションを行った。その結果、TOF 及び 波長 557.7 nm の発光の Life time の分散はコーラスバーストの早い時間変化 (0.2 - 0.5 Hz) を鈍らせる効果があることが分かった。その結果、主脈動はコーラスバーストの速い時間変化 (0.2 - 0.5 Hz) に対して応答することができないことが分かった。この効果が、主脈動とコーラスバーストの周期性の僅かな違いを作り出していると考えられる。

本研究により、これまで示されていなかった主脈動及びコーラスバーストの統計的な関係性及びその周期性がどのようなパラメータに依存しているかが明らかとなった。加えて、PsA の発光に寄与している電子が磁気圏 - 電離圏間の過程でどのような影響を受けるかについて、シミュレーションを行い、TOF 及び波長 557.7 nm の Life time が主脈動の周期性に影響を与えることを示した。

TOF 及び Life time の分散により、コーラスバーストの早い時間変化 (0.2 - 0.5 Hz) を鈍ることが本研究のシミュレーションにより示されたが、主脈動と再現された波長 557.7 nm の周波数分布の間には、主脈動が僅かに長い周期性を持つという差異が見られた。この差異は、観測位置、解析期間、更にシミュレーションのデータセットとして与えた電子のエネルギー分散及び Life time の分散が一定であったことに起因していると考えられる。従って、今後は地上光学観測と同じ位置での衛星電磁場観測により得られたデータによる解析や、電子の降り込み後即時発光するような波長を用いた地上光学観測が必要となる。また、本研究により、主脈動及びコーラスバーストの周期性の統計的な性質は明らかとなったため、今後は内部変調やコーラスエレメントの周期性についての解析を行っていく必要がある。

第7章 謝辞

本研究にあたり、終始ご丁寧な指導をしていただいた細川 敬祐准教授に深い感謝の意を表します。研究のみでなく学会準備や論文作成を進める際に構成や文章の細部にわたって詳細に指導してくださいました。国立極地研究所の小川 泰信准教授には全天 WATEC 並列イメージャから得られたデータについての取り扱い方や、研究の相談に乗って頂き、的確な助言を頂きました。ミネソタ大学の Aaron Breneman 研究員、名古屋大学の栗田 怜研究員には FBK データの解析について指導して頂き、的確な助言を頂きました。ここに感謝いたします。最後に共に研究に励んできた研究室の同期にも深い感謝を致します。

参考文献

- [1] Brekke, A., and K. Henriksen (1972), The intensity ratio and the effective life time of O(1S) atoms in pulsating aurora, *Planet Space Sci.*, 20, 53-60
- [2] Duncan, C. N, F. Creutzberg, R. L. Gattinger, F. R. Harris, and A. Vallancejones (1981), Latitudinal and temporal characteristics of pulsating auroras. *Can. J. Phys.*, 59, 1063-1069
- [3] Henriksen, K. (1974), The auroral observations, *Thesis, Tromso, Norway*.
- [4] Jones, S. L., M. R. Lessard, K. Rychert, E. Spanswick, and E. Donovan (2011), Large scale aspects and temporal evolution of pulsating aurora, *J. Geophys. Res.*, 116, A03214, doi:10.1029/2010JA015840
- [5] Kataoka, R., Y. Miyoshi, D. Hampton, T. Ishii, and H. Kozako (2012), Pulsating aurora beyond the ultra-low frequency range, *J. Geophys. Res.*, 117, A083336, doi:10.1029/2012JA017987
- [6] Kennel, C. F., and H. E. Petschek (1966), Limit on stably trapped particle fluxes, *J. Geophys. Res.*, 71(1), 128, doi:10.1029/JZ071i001p00001
- [7] Kletzing, C. A., et al. (2013), The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on the Radiation Belt Storm Probes Mission, *Space Sci. Rev.*, 179, 127-181, doi:10.1007/s11214-013-9993-6.
- [8] Kvitte, G. J. and H. Pettersen (1969), Morphology of the pulsating aurora, *Planet. Space Sci.*, 17, 15991607, doi:10.1016/0032-0633(69)90148-2.
- [9] Li, W., J. Bortnik, Y. Nishimura, R. M. Thorne, and V. Angelopoulos (2012), The origin of pulsating aurora: Modulated whistler mode chorus waves, in *Auroral Phenomenology and Magnetospheric Processes: Earth and Other Planets*, edited by A. Keiling et al., pp. 379-388, AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/2011GM001164.
- [10] McEwen, D. J., E. Yee, B. A. Whalen, and A. W. Yau (1981), Electron energy measurements in pulsating auroras, *Can. J. Phys.*, 59, 1106.
- [11] Miyoshi, Y., Y. Katoh, T. Nishiyama, T. Sakanoi, K. Asamura, and M. Hirahara (2010), Time of flight analysis of pulsating aurora electrons, considering wave-particle interactions with propagating whistler mode waves, *J. Geophys. Res.*, 115, A10312, doi:10.1029/2009JA015127.

- [12] Miyoshi, Y., et al. (2015), Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probes observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 27542766, doi:10.1029/2014JA020690.
- [13] Nishimura, Y., et al. (2010), Identifying the driver of pulsating aurora, *Science*, 330, 8184.
- [14] Nishimura, Y., et al. (2011), Multievent study of the correlation between pulsating aurora and whistler mode chorus emissions, *J. Geophys. Res.*, 116, A11221, doi:10.1029/2011JA016876.
- [15] Nishiyama, T., T. Sakanoi, Y. Miyoshi, Y. Katoh, K. Asamura, S. Okano, and M. Hirahara (2011), The source region and its characteristic of pulsating aurora based on the Reimei observations, *J. Geophys. Res.*, 116, A03226, doi:10.1029/2010JA015507.
- [16] Ogawa, Y., A. Kadokura, T. Motoba, Y. Tanaka, and K. Hosokawa (2013), Processing and visualization of large amounts of auroral data obtained with All-sky/Narrow field-of-view parallel imagers in Tromsø and Longyearbyen, *J Space Sci Inform Japan*, 2, 51-61
- [17] Oguti, T. (1975), Metamorphoses of aurora, *Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Ser. A*, 12, 1-101.
- [18] Royrvik, O., and T. N. Davis (1977), Pulsating aurora: Local and global morphology, *J. Geophys. Res.*, 82(29), 47204740.
- [19] Sandahl, I., L. Eliasson, and R. Lundin (1980), Rocket observations of precipitating electrons over a pulsating aurora, *Geophys. Res. Lett.*, 7(5), 309312.
- [20] Thorne, R. M (2010), Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L22107, doi:10.1029/2010GL044990
- [21] Thorne, R. M., B. Ni, X. Tao, R. B. Horne, and N. P. Meredith (2010), Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation, *Nature*, 467, 943946, doi:10.1038/nature09467.
- [22] Wygant, J. R., et al. (2013), The electric Field and Waves Instruments on the Radiation Belt Storm Probes Mission, *Space Sci. Rev.*, 179, 183-220, doi:10.1007/s11214-013-0013-7.
- [23] Sato, N., D. M. Wright, C. W. Carlson, Y. Ebihara, M. Sato, T. Saemundsson, S. E. Milan, and M. Lester (2004), Generation region of pulsating aurora obtained simultaneously by the FAST satellite and a Syowa-Iceland conjugate pair of observatories, *J. Geophys. Res.*, 109, A10201, doi:10.1029/2004JA010419.

- [24] Yamamoto, T. (1984), Temporal and spatial structures of pulsating auroras and possible mechanisms, *Thesis, University of Tokyo*.
- [25] Yamamoto, T. (1988), On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosity, *J. Geophys. Res.*, 93, 8979-11.
- [26] Yamamoto, T., and T. Oguti (1982), Recurrent Fast Motions of Pulsating Auroral Patches, 1. A Case Study on Optical and Quantitative Characteristics During a Slightly Active Period, *J. Geophys. Res.*, 87, 7603-7614.